
□ 論 文

可變構造 理論에 의한 로보트 팔의 追從制御에 관한 研究 (I)

李珍杰* · 許俊永**

A Study on the tracking control of a robot manipulator using variable
structure systems (I)

Jin Kul Lee · Jun Young Huh

Abstract

This study is a step in developing the sliding mode control methodology
for the robust control of a class of nonlinear time-varying systems.

The methodology uses in its idealized form piecewise continuous feedback
control, resulting in the state trajectory "sliding" along a time-varying sliding
surface in the state space. This idealized control law achieves perfect track-
ing. The method is applied to the control of a two-link manipulator handling
variable loads in a flexible manufacturing system environment with noise.

The result through simulation is that the tracking problem of articular ro-
bot with high precision can be realized by using the variable structure system
(VSS) theory. The motions of articular robot were insensitive to various pay-
loads.

1. 緒 論

로보트팔의 制御와 動特性에 관하여는 지금까지
많은 研究가 되어져 왔다.^{1,2)} 로보트팔은 多自由
度, 多關節 機構를 가진 構造로 되어 있어 이의 特
性에는 相互作用하는 項들이 包含되며 이는 로보
트팔의 位置에 따른 重力項과 다른팔의 加速度에
의한 反作用項, link의 運動에 의한 遠心力項 및
coriolis 力項등으로 구성된다. 이들은 로보트팔

의 크기와 무게가 커질수록, 또 負荷가 加해질수
록 相互作用하는 項들에 의한 影響은 더욱 커진다.³⁾
로보트팔의 運動은 相互作用하는 特性 외에 時變
的인 特性, 非線形的인 特性을 갖기 때문에 정확
한 位置制御나 軌道 追從制御를 하기 위해서는 특
별한 고려가 필요하다. 이들을 解決하기 위한 研
究로는 線形制御⁴⁾와 非線形制御⁵⁾, 適應制御⁶⁾, sto-
chastic制御方法⁷⁾등이 행하여지고 있다. 線形制
御와 非線形制御 方法에 의한 로보트팔의 制御는
負荷가 정확히 알려져 있어야 하며 로보트팔에 대

* 釜山大學校 工科大學

* 釜山大學校 大學院

한 모델링도 정확해야 하나, 適應制御方法과 stochastic 制御方法에 대한 로보트팔의 制御는 計算量이 많기 때문에 實時間 制御가 어렵다.

可變構造系는 불연속 파이드백 制御를 가진 系의 일종으로 이의 特徵은 스위칭 표면에 슬라이딩 모우드가 있는 것이므로 상태軌跡이 슬라이딩 모우드 中에 있을 때는 매개변수 변동이나 외란에 影響을 받지 않는 것이다.⁸⁾ 이 無反應性를 로보트팔의 制御에適用하기 위하여 Young³⁾은 2 関節 로보트팔의 制御에 古典的인 슬라이딩 모우드 方法의 使用을 提案하였으나 이 方法은 슬라이딩面에 도달하기 前까지는 외란이나 系의 매개변수 변동에 影響을 받는다는 단점이 있었다. 따라서 本研究에서는 스위칭 시스템의 動力學에 의해 슬라이딩이 일어날 條件을 구하고, 이것을 이용하여 時變 슬라이딩 모우드가 存在하도록 制御입력을 구하여 可變構造 制御機를 設計하고, 이를 2 関節 로보트팔의 軌道追從問題에 適用하여 理論의 타당성을 증명한다. 또 可變構造系의 매개변수 변동에 대한 無反應性과 외란에 대한 影響도 調査, 檢討한다.

2. 스위칭 시스템의 動力學

다음과 같이 주어지는 動的系를 생각한다.

$$\{x : S(x) > 0\} = : R_+ \text{에 대해 } \dot{x} = f_+(x) \quad \dots \quad (1)$$

$$\{x : S(x) < 0\} = : R_- \text{에 대해 } \dot{x} = f_-(x) \quad \dots \quad (2)$$

여기서 S 를 $\{x : S(x) = 0\}$ 로 정의하고, S 는 $|R^n \rightarrow |R$ 의 函數이다. 또 $f_+(x)$ 와 $f_-(x)$ 는 $|R^n \rightarrow |R^n$ 의 平滑函數이다.

보통 f_+ 와 f_- 는 動的特性이 S 에서 불연속이 되도록 S 위에서 만나며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 f_+ 와 f_- 의 軌跡은 둘다 불연속면 S 를 향하게 된다. 적관적으로 스위칭구조는 상태軌跡이 S 를 아주 많이 가로지르든가 또는 불연속면을 따라 chattering하게 된다. Fig. 1의 시스템을 정착화하는 한 方法은 Fig. 2의 히스테리스 스위칭에 카니즘이다. 변수 y 는 스위칭변수로 $y = +1$

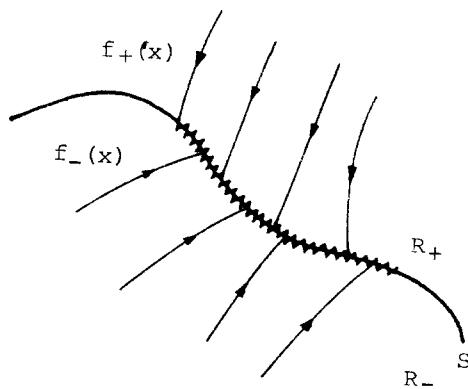


Fig. 1. Switching surface

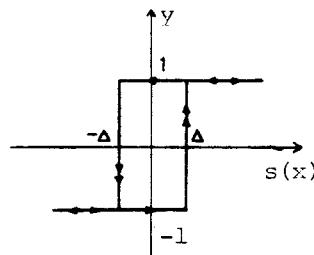


Fig. 2. Hysteretic switching

일때 動力學은 $f_+(x)$ 에 의해 묘사되고, $y = -1$ 일 때는 $f_-(x)$ 에 의해 묘사된다. 이 정착화 方法을 Fig. 1의 예에 적용시키면 충분히 작은 값 Δ 에 대해 Fig. 3에 그려진 軌跡을 나타낸다.

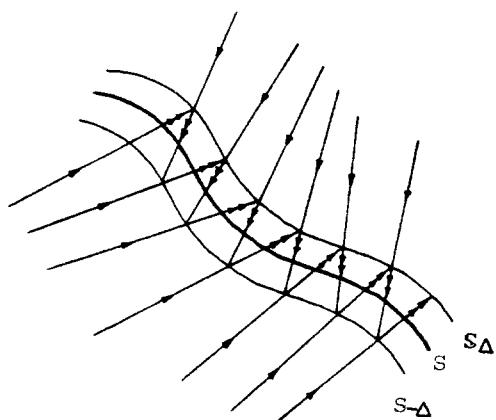


Fig. 3. Hysteretic switching surface

상태軌跡이 S 위에서 슬라이딩하는 條件을 구하기 위해 다음과 같이 나타낸다.

$$\lambda_+(x) = \frac{\partial}{\partial x} S(x) f_+(x) \quad (x \in R_+) \quad (3)$$

$$\lambda_-(x) = \frac{\partial}{\partial x} S(x) f_-(x) \quad (x \in R_-)$$

여기서 $\lambda_+(x)$ 는 $f_+(x)$ 의 軌跡을 따른 $S(x)$ 의 變化率을 나타내고 $\lambda_-(x)$ 는 $f_-(x)$ 의 軌跡을 따른 $S(x)$ 의 變化率을 나타낸다. 初期狀態에서 출발한 軌跡이 S 에 수렴하는 것과 S 를 따라 슬라이딩하는 것을 保障하는 條件은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\begin{aligned} \lambda_+(x) &< 0 \quad \text{단, } x \in B(x^*, \delta) \cap R_+ \\ \lambda_-(x) &> 0 \quad \text{단, } x \in B(x^*, \delta) \cap R_- \end{aligned}$$

여기서 $B(x^*, \delta)$ 는 x^* 에 중심을 가진 반경 δ 만큼의 近傍이다. 위 條件은 다음과 같이 結合될 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_+(x; t) &= \frac{\partial}{\partial t} S(x; t) + \frac{\partial}{\partial x} S(x; t) f_+(x; t) \\ \lambda_-(x; t) &= \frac{\partial}{\partial t} S(x; t) + \frac{\partial}{\partial x} S(x; t) f_-(x; t) \end{aligned}$$

時變系일 경우는 t 변수를 가진 상태공간으로 擴張하면 앞에서 展開한 形式으로 쉽게 바꿀 수 있으므로 時變系에서의 軌跡은 M_0 에 일단 도달하면 M_0 를 따라 슬라이딩 한다.

앞에서와 같이 유일한 解가 存在할 條件은 다음의 두 부등식 중 적어도 하나가 $(x^*; t^*) \in M_0$ 의 각 點에 대해 만족되면 된다.

$$\lambda_-(x^*; t^*) > 0, \lambda_+(x^*; t^*) < 0 \quad \dots \dots \dots (5)$$

여기서 $\lambda_+(x^*; t^*) < 0$ 는 $M_+ = \{(x; t); S(x; t) > 0\}$ 인 $(x; t) \in B((x^*; t^*), \delta) \cap M_+$ 에 대해 $\lambda_+(x; t) < 0$ 을 뜻한다. 또한 $\lambda_-(x^*; t^*) > 0$ 은 $M_- = \{(x; t); S(x; t) < 0\}$ 인 $(x; t) \in B((x^*; t^*), \delta) \cap M_-$ 에 대해 $\lambda_-(x; t) > 0$ 을 뜻한다. 또 M_0 를 따라 슬라이딩 할 條件은

$$\lambda_-(x; t) > 0,$$

$$\text{단, } (x; t) \in B((x^*; t^*), \delta) \cap M_-$$

$$\frac{d}{dt} S^2(x) < 0 \quad \text{단, } x \in B(x^*, \delta) - S \quad \dots \dots \dots (3)$$

式(3)을 局所 슬라이딩 條件이라고 한다. 그리고 이 條件이 어떤 函數 ψ 에 대하여 다음과 같다면

$$\frac{d}{dt} S^2(x) < -\psi(|S|) \quad \text{단, } x \in \mathbb{R}^n - S \quad (4)$$

S 로부터 조금 떨어져 있는 모든 初期狀態는 S 로 끌릴 것이다. 즉 式(4)는 전체 슬라이딩 條件이다. 上記의 展開는 静的인 경우에 대한 것이다. 즉 S, f_+, f_- 가 時間의 函數가 아니다. S, f_+, f_- 가 x 와 t 의 函數일 때 다음과 같이 그 展開가 일반화될 수 있다. (x, t) 공간에서 슬라이딩 면을 다음과 같이 定義한다.

$$M_0 = \{(x; t); S(x; t) = 0\} \subset \mathbb{R}^{n+1}$$

$$\lambda_+(x; t) < 0$$

$$\text{단, } (x; t) \in B((x^*, t^*), \delta) \cap M_+$$

위 條件은 다음과 같이 結合될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} S^2(x; t) < 0$$

$$\text{단, } (x; t) \in B((x^*, t^*), \delta) - M_0$$

..... (6)

式(6)을 局所 슬라이딩 條件이라고 한다. 만약 $S(x; t)$ 가 적당한 函數이고, 어떤 函數 ψ 에 대해 다음 式을 만족한다면 M_0 로부터 약간 떨어져 있는 모든 初期條件은 M_0 로 끌리고 M_0 를 따라 슬라이딩 할 것이다.

$$\frac{d}{dt} S^2(x; t) < -\psi(|S|)$$

$$\text{단, } (x; t) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ - M_0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

□ 論 文

상태공간 \mathbb{R}^n 에서 M_0 를 다음과 같이 $S(t)$ 로 표시할 수 있다.

$$S(t) = \{ x \in \mathbb{R}^n : s(x; t) = 0 \} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

그러면 局所 슬라이딩 條件인 式(6)과 전체 슬라이딩 條件인 式(7)은 時變인 경우 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} S^2(x; t) < 0$$

$$\text{단, } x \in B(x^*, \delta) - S(t) \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$x_1^{(n)} + a_{n-1}(t)x_1^{(n-1)} + a_{n-2}(t)x_1^{(n-2)} + \dots + a_0(t)x_1 = u \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

먼저 베타를 定義한다.

$$\begin{aligned} x(t) &= [x_1(t), \dot{x}_1(t), \dots, x_1^{(n-1)}(t)]^T \\ &\in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_d(t) &= [x_{d1}(t), \dot{x}_{d1}(t), \dots, x_{d1}^{(n-1)}(t)]^T \\ &\in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

且 追從誤差를 다음과 같이 定義한다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x_d(t) = [\tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_n(t)]^T$$

$$x_1^{(n-1)} + \sum_{i=0}^{n-2} C_{i+1} x_1^{(i)} = x_{d1}^{(n-1)} + \sum_{i=0}^{n-2} C_{i+1} x_{d1}^{(i)} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

$x_1^{(i)}$ 에 관한 初期條件이 $x_{d1}^{(i)}$ 에 관한 것과 일치하기 때문에

$$x(t) \equiv x_d(t), \quad \forall t \in \mathbb{R}_+$$

이제는 $(x; t)$ 軌跡의 式(13)에 의해 指定된

$$u(t) = \beta^T(x) x + \sum_{i=1}^{n-1} K_i(x; t) \tilde{x}_{i+1} - K_n \operatorname{sgn}(s) \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

式(15)를 使用하면 다음式을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2(x; t) &= \sum_{i=1}^n (\beta_i(x) - a_{i-1}(t)) x_i S + \sum_{i=1}^{n-1} (C_i + K_i(x; t)) \tilde{x}_{i+1} S - \\ &S x_d^{(n)} - K_n |S| \quad \dots \dots \dots \quad (16) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} S^2(x; t) < -\psi(|S(x; t)|)$$

$$\text{단, } x \in \mathbb{R}^n - S(t) \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

3. 슬라이딩 모우드 制御 理論

다음과 같이 묘사되는 단일입력을 가진 n 차 線形 時變 制御系에 대해 指定된 軌跡 $x_{d1}(t)$ 를 追從하는 $x_1(t)$ 를 얻는 制御問題를 생각한다.

초기에 追從誤差가 0이라고 仮定한다.

$$\tilde{x}(0) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

그리고 時變슬라이딩面 $S(t)$ 를 다음과 같이 定義한다.

$$S(x; t) = C \tilde{x}(t) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

여기서 C 는 $[C_1, \dots, C_{n-1}, 1]$ 형태의 열벡터이다. 만약 制御入力 $u(t)$ 가 軌跡을 $S(x; t) = 0$ 위에 유지하도록 選擇될 수 있다면 式(13)으로부터

표현을 따라 슬라이딩하도록 制御入力 $u(t)$ 를 擇하기만 하면 된다. 制御入力 $u(t)$ 는 式(10)의 條件을 만족시키도록 주어져야 한다. 따라서 制御入力 $u(t)$ 를 다음과 같이 취한다.

4. 可變構造 制御機의 設計

2自由度로 보트팔에 대해 지금까지 유도해온
過程에 따라 可變構造 制御機를 設計한다.

Fig. 4에 2關節로 보트팔의 略圖를 나타낸다.
解析에 使用한 기호는 다음과 같다.

θ_1, θ_2 : 그림에 표시한 방향으로 测定한
관절각

T_1, T_2 : 관절 토오크

ℓ_1, ℓ_2 : 링크의 길이

m_1, m_2 : 링크의 질량

I_1, I_2 : 관절을 중심으로 한 링크의 관성
모멘트

ℓ_{g1}, ℓ_{g2} : 관절에서 링크중심까지의 길이

O_{g1}, O_{g2} : 링크의 중심위치

α : O_{g1} 의 위치를 표시하는 각도

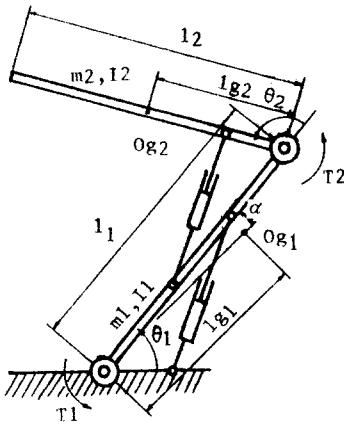


Fig. 4. Link mechanism

링크 機構의 運動方程式은 Lagrange 方程
式을 使用하여 얻을 수 있다. 행렬로 나타내면 다

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{12} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1) + b_2 \dot{\theta}_1^2 \\ b_3 & \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1) + b_4 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 g \\ e_2 g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (28)$$

$$h_{11} = a_1 + 2a_3 \cos \theta_2$$

$$h_{12} = a_2 + a_3 \cos \theta_2, \quad h_{22} = a_2$$

$$e_1 = h_{22} d_1 - h_{12} d_2$$

$$e_2 = -h_{12} d_1 + h_{11} d_2$$

$$u_1 = h_{22} T_1 - h_{12} T_2$$

$$u_2 = -h_{12} T_1 + h_{11} T_2$$

$$f = h_{11} h_{22} - h_{12}^2$$

$$b_1 = h_{22} a_3 \sin \theta_2, \quad b_2 = h_{12} a_3 \sin \theta_2$$

$$b_3 = -h_{12} a_3 \sin \theta_2, \quad b_4 = -h_{11} a_3 \sin \theta_2$$

$$d_1 = -a_4 \cos(\theta_1 - \alpha) - a_5 \cos \theta_1 \\ - a_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$d_2 = -a_6 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$a_1 = I_1 + I_2 + m_1 \ell_{g1}^2 \\ + m_2 (\ell_1^2 + \ell_{g2}^2)$$

$$a_2 = I_2 + m_2 \ell_{g2}^2, \quad a_3 = m_2 \ell_1 \ell_{g2}$$

$$a_4 = m_1 \ell_{g1}$$

$$a_5 = m_2 \ell_1, \quad a_6 = m_2 \ell_{g2}$$

設計의 目的은 원하는 軌跡 $\theta_{dj}(t), (j=1, 2)$
를 追從하는 $\theta_j(t)$ 를 얻는 것이다. 따라서 時變

슬라이딩面 $S(t)$ 를 다음과 같이 택한다.

$$S_j(x; t) = (\dot{\theta}_j - \dot{\theta}_{dj}) + 5(\theta_j - \theta_{dj}), \quad j = 1, 2 \dots\dots (29)$$

u_1, u_2 를 式(15)와 같은 형태로 잡아준다.

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \beta_{11} \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \beta_{12} \dot{\theta}_1^2 + K_{11} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{d1}) - K_{12} \operatorname{sgn} S_1 \\ u_2 &= \beta_{21} \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \beta_{22} \dot{\theta}_1^2 + K_{21} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{d2}) - K_{22} \operatorname{sgn} S_2 \end{aligned} \right] \dots\dots\dots (30)$$

式(16)이 式(10)의 條件을 만족시키도록 다음과 같이 각 변수를 취한다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) S_1 &> 0 \text{ 일 때} \\ \beta_{11} &= -b_1 - \delta_1 \\ \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) S_1 &< 0 \text{ 일 때} \\ \beta_{11} &= -b_1 + \delta_2 \end{aligned} \dots\dots\dots (31)$$

$$S_1 > 0 \text{ 일 때 } \beta_{12} = -b_2 - \delta_3$$

$$S_1 < 0 \text{ 일 때 } \beta_{12} = -b_2 + \delta_4$$

$$(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{d1}) S_1 > 0 \text{ 일 때 } K_{11} = -5.1 f$$

$$(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{d1}) S_1 < 0 \text{ 일 때 } K_{11} = -4.9 f$$

$$S_1 > 0 \text{ 일 때 } K_{12} = e_1 g - \dot{\theta}_1 f + \delta_5$$

$$S_2 < 0 \text{ 일 때 } K_{12} = -e_2 g + \ddot{\theta}_1 f + \delta_6$$

여기서 δ_j , ($j = 1, \dots, 6$)은 외판에 관계되는 적당한 상수이다. S_2 에 관한 것은 省略한다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

本研究에 의한 理論의 타당성을 立證하기 위하여 本 実驗室에서 製作한 2關節 로보트팔을 모델로 하여 시뮬레이션한다. 로보트팔이 軌道追従을 하도록 하기 위해서는 軌跡計劃이 세워져야 하고, 且 軌跡에 대한 角位置, 角速度 및 角加速度가 구해져야 한다.

5-1. 시뮬레이션 모델

모델로 定한 로보트팔은 2自由度 電氣・油壓式이며 여기서는 구동부의 動特性은 무시한다. 모델

의 形狀을 Fig. 5에, 그 제원을 Table 1에 나타낸다.

Table. 1. Specification of model robot arm

i	m_i kg s ² /m	I_{ii} kg m s ²	ℓ_{gi} m	ℓ_i m	α deg
1	2.05	0.546	0.7	0.915	5
2	2.86	0.625	0.6	1.5	0

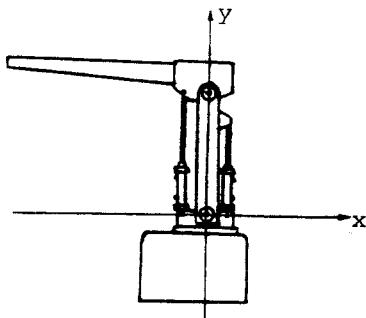


Fig. 5. Schematic diagram of simulation model

5-2. 軌跡計劃

로보트팔의 일반적인 直線軌跡計劃에 관한 研究는 R.H.Taylor⁹⁾에 의한 研究가 있으나 本 研究에서는 비교적 간단한 直線軌跡을 目標軌跡으로 定한다. 즉, endeffector가 Fig.5의 直交座標의 (-1.07m, 1.0m)에서 (-1.07m, 2.0m) 까지 直線軌道를 따라 움직이도록 한다. 直線軌道는 加速度軌道가 定해지면 速度와 位置軌道가 定해진다. 加速度軌道는 시작과 끝에 最大加速 最大減速을 가지는 Fig.6과 같이 定하고, 이때의 速度軌道와 位置軌道를 Fig.6에 함께 나타낸다.

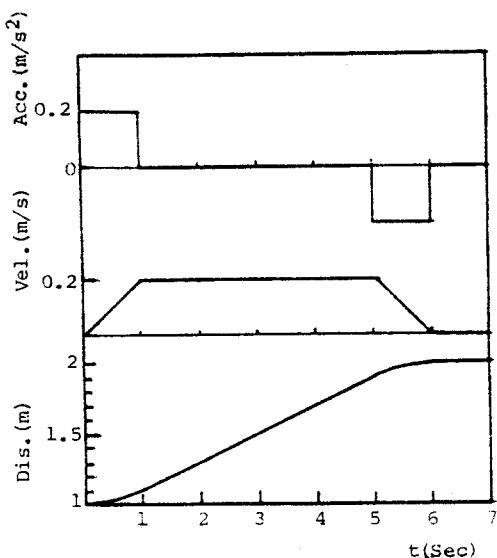


Fig. 6. Trajectory planning in X-Y coordinate

조인트 座標에서의 조인트 角位置 $\theta(t)$ 는 餘弦 法則 등에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - \ell_1^2 - \ell_2^2}{2\ell_1\ell_2} \right)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\ell_2 \sin \theta_2}{\ell_1 + \ell_2 \cos \theta_2} \right)$$

角速度, 角加速度는 Inverse kinematics에 의해 구해진다.²⁾

5-3. 시뮬레이션 内容 및 方法

로보트 팔의 운동을 4 차의 Runge-kutta 法으로 시뮬레이션하였다. 샘플링週期는 5msec로 하였다. 可变構造系의 負荷에 대한 無反應性를 調査하기 위해 無負荷, 5kg, 10kg의 負荷를 加載을 경우의 追従軌跡을 구하였다. 또 의란에 대한 無反應性은 각 關節각에 대해 $(1.12^\circ, -1.39^\circ)$, $(0.92^\circ, -1.67^\circ)$ 사이에 무작위로 分布된 임펄스測定雜音을 添加하여 그 影響을 調査하였다. 使用한 测定雜音의 週期는 50msec로 하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. 또 式(31)에서의 적당한 상수 δ_j ($j=1, \dots, 6$)가 입력to 오크와 軌跡의 追従精度에 미치는 影響을 調査하기 위해 δ_j 가 0.5와 1일 때의 追従軌跡과 토오크 軌跡을 구하였다. Fig. 8에 시뮬레이션 프로그램의 유동도를 나타내었다.

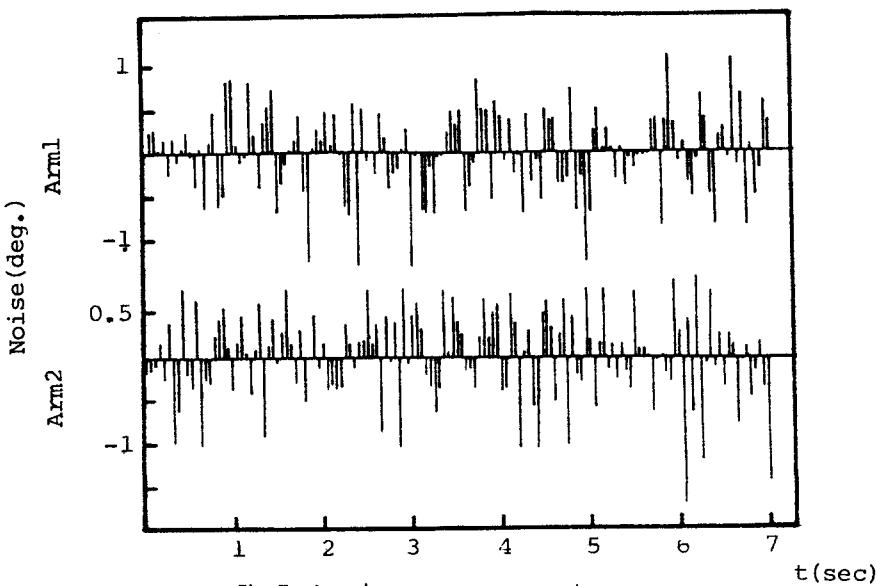


Fig. 7. Impulse measurement noise

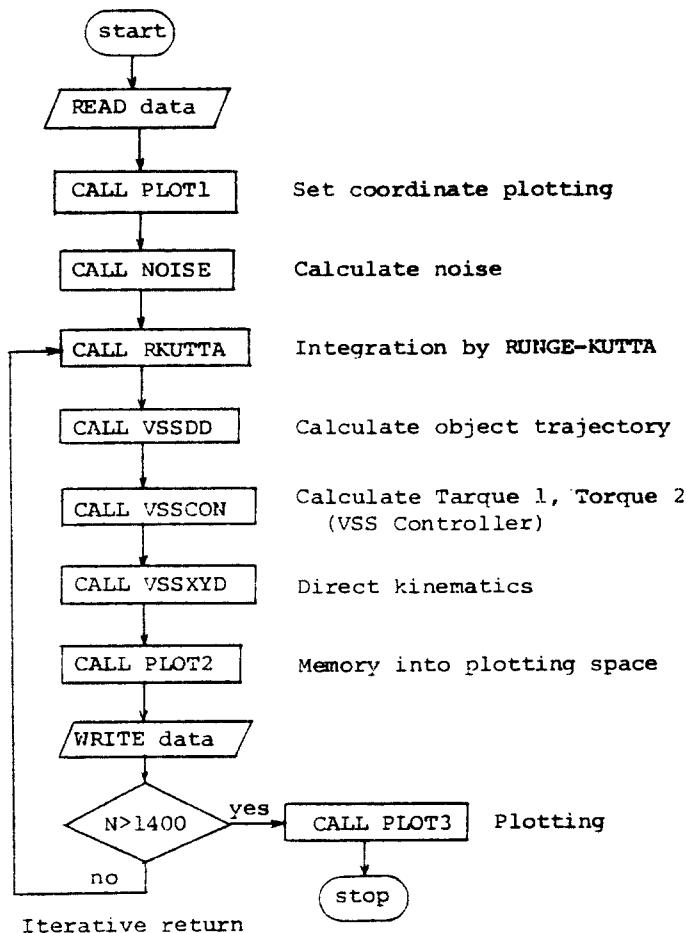


Fig. 8. Program flow chart

6. 시뮬레이션 결과 및考察

Fig. 9는 無負荷인 경우의 目標軌跡에 대한 追従軌跡 및 可變構造系의 制御法則에 의해 구한 토오크를 나타낸 것이다. 그림의 실선은 目標角軌跡이고, 1점쇄선은 目標角速度軌跡이며 점선은 각각에 대한 追従軌跡을 나타낸다. 目標角軌跡과 追従角軌跡 사이의 角誤差의 範圍는 로보트팔 1, 2의 各 關節에 대해 $(0.03^\circ, -0.067^\circ)$, $(0.051^\circ$

$-0.03^\circ)$ 이고, 最大 角速度 誤差는 각각 $0.335\text{deg.}/\text{sec}$, $-0.284\text{ deg.}/\text{sec}$ 로 로보트팔의 이동角과 角速度가 目標軌跡을 아주 높은 精度로 追従하고 있음을 알 수 있다. 이때 各 關節에 가해진 토오크는 그림에 나타낸 것과 같이 어떤 範圍内를 chattering하고 있다. 可變構造系의 負荷에 대한 無反應性은 5 kg , 10 kg 의 負荷를 End-effector部分에 加하여 調査하였으며 이 때의 로

보트팔 1, 2의 角 關節에 대한 角誤差의 範圍와 角速度誤差의 範圍를 無負荷인 경우와 함께 Table 2에 나타내었다.

標에서 보는바 같이 負荷를 加했을 때의 로보트 팔의 移動角 및 角速度의 誤差의 範圍가 無負荷인 경우와 거의 같음을 알 수 있으며, 実驗의 範圍內에서는 오히려 精度가 더 높아지는 경향으로 나타났다. 그러므로 可變構造系로 로보트팔을 追從制御하면 負荷의 影響을 받지 않는 것을 알 수 있다.

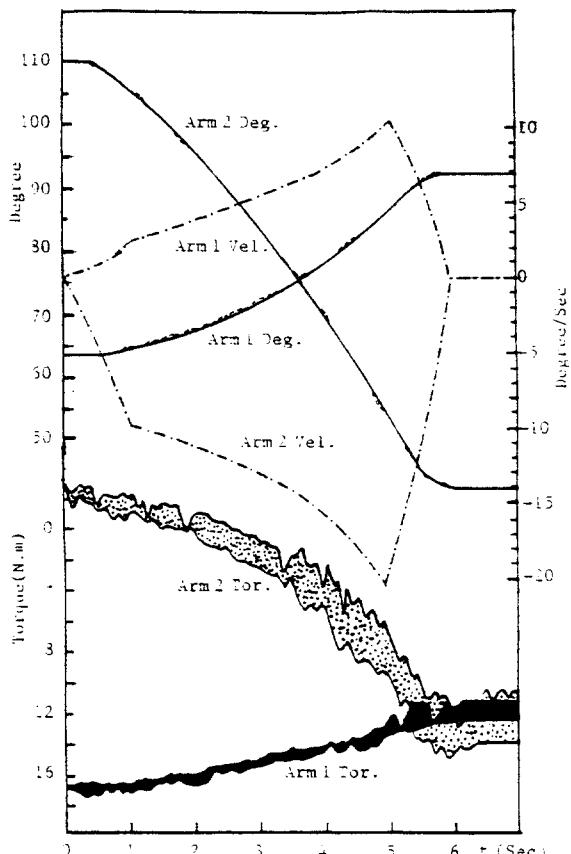


Fig. 9. Theoretical results of no load

Fig.10은 각 關節角에 대해 Fig.7과 같은 임펄스 测定雜音을 添加하여 외란에 대한 無反應性를 檢討한 것이다. 이때 상수 δ_j , ($j=1,\dots,6$)의

Table. 2. Range of error for various load

	부하 항목	무 부하	5 kg	10 kg
각오차 (deg.)	1	(0.03-0.067)	(0.01,-0.053)	(0.024,0.07)
	2	(0.051,-0.03)	(0.057,0.001)	(0.062,-0.001)
각속도 (deg./s)	1	(0.335,1.094)	(0.462,-0.004)	(0.352,-0.074)
	2	(1.13,-0.284)	(0.005,-0.291)	(0.003,-0.31)

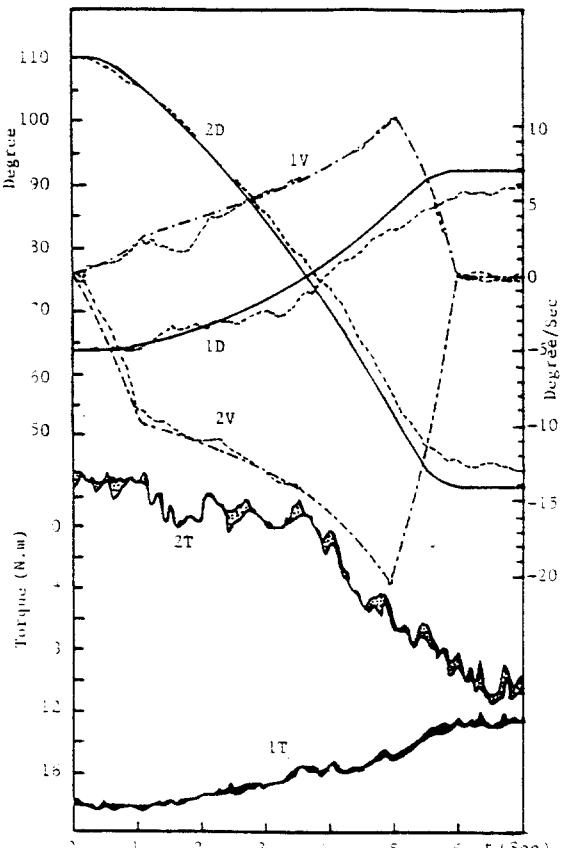


Fig. 10. Theoretical results of 5kg load with noise

값은 모두 0.5로 하였다. 角誤差의 範圍는 로보트팔 1,2의 各 關節에 대해 $(4.798^\circ, -1.941^\circ)$, $(1.669^\circ, -4.839^\circ)$ 이고, 角速度 誤差는 각각 $(2.043^\circ/\text{sec})$,

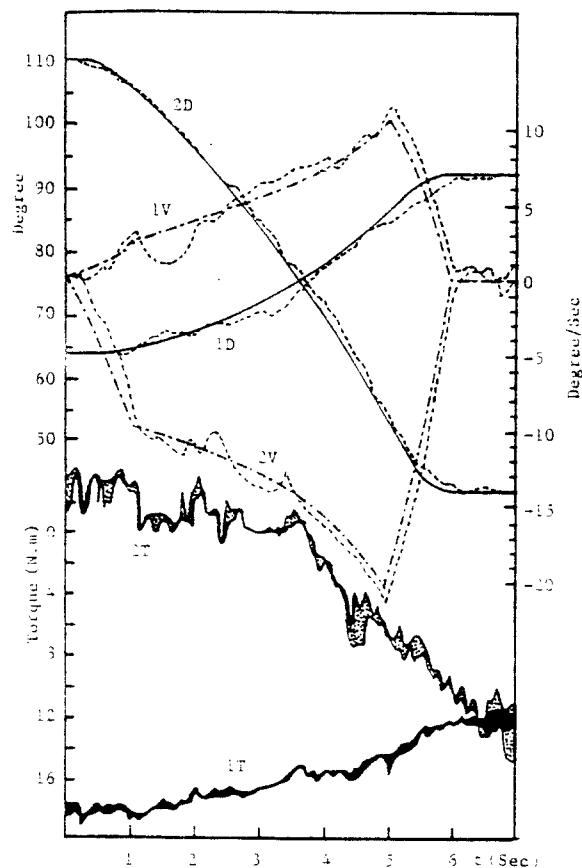


Fig. 11. Theoretical results of 10kg load with noise

-0.21) deg./sec, (0.247, -1.576) deg./sec이다. 添加한 임펄스雜音은 대단히 큰 경우이므로 角誤差의 範圍는 雜音이 없는 경우에 비해 크게 拡張되었으나 目標軌跡을 비교적 잘 追從하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 10에서와 같이 Fig. 7의 임펄스 测定雜音을 각 關節에 加한 것으로 상수 δ_j ($j=1, \dots, 6$) 가 모두 1인 경우이다. 角誤差의 範圍는 로보트팔 1, 2의 각 關節에 대해 $(3.651^\circ, -2.032^\circ)$, $(1.291^\circ, -2.829^\circ)$ 이고, 角速度誤差는 각각 $(2.543, -1.187)$ deg./sec, $(1.147, 2.434)$ deg./sec이다. Fig. 10과 Fig. 11을 비교하여 보면 상수 δ_j 의 影響을 알 수 있다. 상수 δ_j 가 1인 Fig. 11에서는 δ_j 가 0.5인 Fig. 10에서 보다 角誤差의 範圍가 약 0.6 배로 減少하였으나

角速度誤差는 약 2배로 증가하였고, 토오크 chattering 폭도 더 커지고 变化도 심하게 나타났다. 따라서 상수 δ_j 를 크게 하면 角誤差의 範圍는 무시할 만큼 작게 할 수 있으나 이때 가해지는 토오크의 chattering 폭은 커지고 그 变化도 극심하여 機械裝置에 고주파 진동이 수반될 것으로 생각되어진다.

여기서는 외란이 關節 1, 2에 대해 각각 $(1.12^\circ, -1.39^\circ)$, $(0.92^\circ, -1.67^\circ)$ 의 範圍에서 50 msec마다 무작위로 加해지는 대단히 혹심한 경우이며, 보통의 산업용 로보트에서는 비교적 적은 외란이 가해지므로 可變構造系로 制御하게 되면 외란의 影響을 거의 받지 않을 것으로 사료된다.

追從精度를 그대로 유지하면서 토오크 chattering 폭을 작게하고, 또 可變構造制御機를 실제 장치에 부착하여 使用하는 문제 등은 금후 계속 연구 검토하고자 한다.

7. 結論

로보트팔의 運動에 相互作用하는 特性 및 時變的 特性를 배제하고 制御精度를 向上시키기 위하여 可變構造系의 制御理論으로 電氣・油壓式 서어보機構로 된 2 關節形 로보트팔을 모델로 시뮬레이션하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 目標軌跡에 대한 로보트팔의 追從軌跡의 角誤差 및 角速度誤差範圍는 각각 $(0.03^\circ \sim -0.067^\circ)$, $(0.335 \sim 1.094$ degree/sec)로 매우 근소하며 目標軌跡를 아주 높은 精度로 追從하였다.
2. 負荷에 대한 無反應性은 매우 우수하였으며 (10 kg부하를 가했을 경우 角誤差와 角速度差範圍는 각각 $(0.024^\circ \sim -0.07^\circ)$, $(0.352 \sim -0.074$ degree/sec)임), 無負荷인 경우보다 負荷를 가한 경우의 追從精度가 오히려 더 向上되는 경향을 나타내었다.
3. 임펄스 测定雜音에 의한 無反應性도 良好하여 目標軌跡을 비교적 잘 추종하였다.
4. 외란에 관계되는 상수 δ_j 를 크게 하면 角誤差의 範圍는 작아지나 토오크의 chattering 폭은 커진다.

References

1. Richard P. Paul, *Robot Manipulators*, MIT Press, Cambridge, 1981.
2. M. Brady, J.M. Hollerbach, T.L. Johnson, T.L. Pérez, and M.T. Mason, *Robot Motion*, MIT Press, Cambridge, 1982.
3. K.K.D. Young, Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, *IEEE Trans.*, Vol.SMC-8, No.2, pp.101-109, 1978.
4. J.Y. S. Luh, M.W. Walker, and R.P.C. Paul, Resolved-Acceleration control of Mechanical Manipulators, *IEEE Trans.*, Vol.AC-25, No.3, pp.468-474, 1980.
5. E. Freund, A Nonlinear Control Concept for Computer Controlled Manipulators, Proc. IFAC-Symp. Multivariable Tech-nological Systems, Frederiction, Canada, pp.395-403, 1977.
6. A.J. Koivo, T.H. Guo, Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.AC-28, No.2, pp.162-170, 1983.
7. M. Takegaki, S. Arimoto, An adaptive trajectory control of manipulators, *Int. J. on Control*, Vol.34, No.2, 1981.
8. J.J. Slotine, S.S. Sastry, Tracking Control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators, *Int. J. Control*, Vol.38, No.2, pp.465-492, 1983.
9. R.H. Taylor, Planning and Execution of straight Line Manipulator Trajectories, *IBM J. of R & D*, Vol.23, pp.424-436, 1979.