

同定法에 의한 로봇 매니플레이터의 制御器 設計

正會員 鄭 相 根* 正會員 朴 鍾 國**

Controller Design for Robot Manipulator using Identifier

Sang Keun Chung*, Chong Kug Park** *Regular Members*

要 約

制御對象의 모델이 正確하게 記述되지 않을때, 曖昧함이 夫知의 파라메터로 나타나는 境遇가 많다. 이 曖昧함이 어떤 制約條件을 滿足하는 境遇 로버스트 制御方法을 利用하면 모델이 正確하게 記述되지 않더라도 制御시스템을 構成할 수가 있다. 可變構造 理論을 基礎로한 制御의 特徵은 시스템의 曖昧함에 의한 影響을 高利得饋還으로 除去할 수 있다. 따라서 본 論文에서는 可變構造 理論을 利用한 VSS同定器를 提案하였다. 미끄럼 狀態에 들어있는 制御 시스템이 發生하고 있는 制御入力の 折換現像은 實際 制御對象의 曖昧함(未知 파라메터)의 影響을 反影한다. 따라서 몇번의 操換 入力로부터 有用한 情報을 檢出하여 適當한 同定機構를 選擇해서 이들 情報을 利用하면, 未知 파라메터를 正確하게 定하는 것이 可能하다. 따라서 제한한 동정기를 로봇 매니플레이터의 미지파라메타 동정기에 첨가하여 보다 효과적인 제어를 구성하였다.

ABSTRACT

When the model of control object is not discribed correctly, ambiguity is often expressed by unkown parameter. In a case that this ambiguity satisfies a certain condition of limit, if robust control method is used, even if model is not correctly discribed, control system can be composed.

The characteristic of control based on the variable structure theory is that the influence by ambiguity of system eradicates high-gain feedback. Therefore, in this paper, VSS identifier is proposed.

Transformation of control input producing conxrol system in sliding mode actually reflects influence of ambiguity unkown parameter of control object. If useful information is out from transformation input by a few times of operation, proper indentfy mechanism is selected and this information is used, to decide the unkown parameter is possible.

So, more effective controller was composed by addition of the proposed identifier to the unkown parameter identifier of robot manipulator.

*安養專門大 電子計算科

**慶熙大學校 電子工學科

Dept. of Electronics Eng. Kyung Hee University

論文番號 : 92-104 (接受1992. 8. 29)

I. 서 론

制御對象의 모델이 正確하게 記述되지 않을때, 曖昧함이 未知의 파라메터로 나타나는 境遇가 많다. 이 曖昧함이 어떤 制約條件을 滿足하는 境遇 로버스트 制御方法을 利用하면 모델이 正確하게 記述되지 않더라도 制御시스템을 構成할 수가 있다. 可變構造理論을 基礎로한 制御의 特徵은 시스템의 曖昧함에 의한 影響을 高利得饋還으로 除去할 수 있다. 따라서 未知파라메터의 變動範圍가 크면 시스템이 平衡點(超平面)의 近方에 있을때 制御入力이 심하게 變化한다. 制御入力の 크기는 未知 파라메터의 既知 變動範圍에 比例하므로, 未知 파라메터의 變動範圍가 크면 클수록 超平面 近方에서 全시스템의 에너지 消費는 크게된다. 따라서 이를 補償하기 위하여 스무딩法이 提案되었으나 이는 制御시스템의 로버스트性도 減少시키는 結果를 招來하였다. 로버스트性을 維持하기 위해서는 制御入力の 變動幅을 減少시키면서 未知파라메터의 變動範圍을 同定하거나 작게하여 制御入力の 變換幅을 적게하는 것이 가장 理想的이다. 그러나 이 方法도 測定可能한 入出力 및 시스템狀態의 情報로부터 未知파라메터 P를 同定하여 曖昧함을 除去하는 것이 必要하다. 따라서 本 論文에서는 可變構造理論을 利用한 VSS同定器를 提案하였다. 미끄럼 狀態에 들어있는 制御 시스템이 發生하고 있는 制御入力の 折換現象은 實際 制御對象의 曖昧함(未知 파라메터)의 影響을 反影한다. 따라서 몇번의 操作과 折換 入力으로 부터 有用한 情報를 檢出하여 適當한 同定機構를 選擇해서 이들 情報를 利用하면, 未知 파라메터를 正確하게 定하는 것이 可能하다. 따라서 제안한 동정기를 로봇 매니플레이터의 미지 파라메타 동정기에 첨가하여보다 効果적인 제어를 구성하였다.

II. 同定法

1. 同定對象의 記述

線形시스템 $\Sigma(A, b, c)$ 에 대한 同定은 適應同定法, 最小自乘法 등이 있으나 여기서는 可變構造法을 利用한 同定法을 提案한다. 一般的으로 非線形 시스템 $\Sigma(f, b)$ 에 대한 同定時 파라메터 同定은 困難하나 여기서 파라메타 空間 P와 非線形項과의 線形分離가 可能한 것으로 한다. 즉,

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1} \quad (i = 1, \dots, n) \\ \dot{x}_n &= \theta^T(p) \xi + \phi^T(p) \eta u + b_0 u \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 未知 파라메터에 관해서 다음 事前情報가 주어진다.

$$p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \quad (2)$$

따라서 p와 $\theta(p)$ 와 $\phi(p)$ 의 要素의 上限과 下限을 確定할 수가 있다.

$$\theta_{i,\min} \leq \bar{\theta}_i(p) \leq \theta_{i,\max} \quad (3)$$

$$\phi_{i,\min} \leq \bar{\phi}_i(p) \leq \phi_{i,\max} \quad (4)$$

이때, 可變構造理論에 의한 同定器를 構成하고, 短期記憶(STM) 要素와 適當한 忘却要素를 利用하면 벡터 $\theta(p)$ 와 $\phi(p)$ 의 同定이 實現된다.

2. VSS 同定器의 構成

超平面 σ 를 다음과 같이 選擇한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^n h_i (X_{i1}(t) - X_i(t)) \quad (\text{단, } h_n = 1) \quad (5)$$

制御入력을 다음과 같이 構成한다.

$$u = u_0 + u_v \quad (6)$$

$$u_0 = (\sigma - \hat{\theta}^T(t) \xi) (b_0 + \hat{\phi}^T(t) \eta)^{-1} \quad (7)$$

$$u_v = \frac{(d^T |\xi|_1 + 1^T |\eta u_0|_1) \text{sgn}(\sigma)}{r} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } d^T = [d_1, \dots, d_n] \quad (9)$$

$$1^T = [1_1, \dots, 1_n] \quad (10)$$

$$d_i = |\theta_{i,\max} - \theta_{i,\min}| \quad (11)$$

$$1_i = |\phi_{i,\max} - \phi_{i,\min}| \quad (12)$$

이다. $\hat{\theta}(t)$ 와 $\hat{\phi}(t)$ 는 다음에 나타난 同定器의 出力이다.

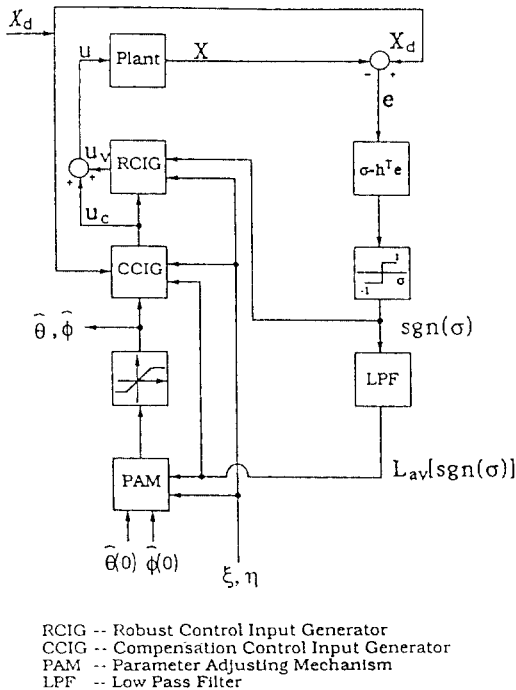
$$\hat{\theta}(t) = \begin{cases} \theta_{imin} & \text{if } \hat{\theta}_i(t) \leq \theta_{imin} \\ \int_{t_0}^t k(t) \xi_i \omega dt + \hat{\theta}_i(t_0) & \text{if } \theta_{imin} < \hat{\theta}_i(t) < \theta_{imax} \\ \theta_{imax} & \text{if } \hat{\theta}_i(t) \geq \theta_{imax} \end{cases} \quad (13)$$

$$\hat{\phi}(t) = \begin{cases} \phi_{imin} & \text{if } \hat{\phi}_i(t) \leq \theta_{imin} \\ \int_{t_0}^t k(t) \eta_i u_{eq} \omega dt + \hat{\phi}_i(t_0) & \text{if } \theta_{imin} < \hat{\phi}_i(t) < \theta_{imax} \\ \theta_{imax} & \text{if } \hat{\phi}_i(t) \geq \theta_{imax} \end{cases} \quad (14)$$

$$\omega = \hat{\theta}^T(t) \xi + \hat{\phi}^T(t) \eta u_{eq} + b_0 u_{eq} - \nu \quad (15)$$

u_{eq} 는 等價制御入力이다. 여기서 制御入力 u 를 低域 필터 L_{av} 을 통해 얻은 값을 等價入力으로 한다.

$$u_{eq} = L_{av} [u] \quad (16)$$



RCIG -- Robust Control Input Generator
 CCIG -- Compensation Control Input Generator
 PAM -- Parameter Adjusting Mechanism
 LPF -- Low Pass Filter

그림1. On-Line VSS 동정기의 블록선도
 Fig 1. Block diagram of on-line VSS identification system

$k(t)$ 는 短調減少한 正定函數이다.

同定機構의 構成을 그림 1에 나타냈다.

분명히 積分器와 低域필터 L_{av} 는 STM要素의 役割을 한다. 函數 $k(t)$ 는 忘却要素이다. 많은 境遇 특히 制御를 自의으로 하는 境遇에는 $\theta(p)$ 와 $\phi(p)$ 까지 同定하면 充分하나, 서기에 p 를 구하고 싶으면 $\hat{\theta}$ 및 $\hat{\phi}$ 의 各要素에 의해서 逆函數를 풀면 좋다.

3. 數値例

이제 다음과 같은 非線形系를 同定對象으로서, 本節에서 提案한 파라메타 同定 알고리즘을 適用한다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (17)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{f_0 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + u}{g_0 + \beta_1 g_1} \quad (18)$$

$$f_0 = x_2^2 + 0.5x_1 |x_2 + \sin(\pi t)|$$

$$f_1 = 10\sin x_1 - 3x_1 x_2 \cos x_1$$

$$f_2 = 8x_1 + e^{-t/2}$$

$$g_0 = 6.5$$

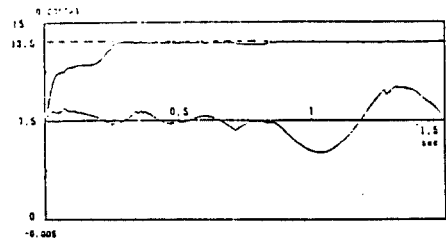
$$g_1 = -0.6\sin x_1$$

$$\alpha_{1max} = 15 \quad \alpha_{1min} = 0 \quad \alpha_1 = 13.5$$

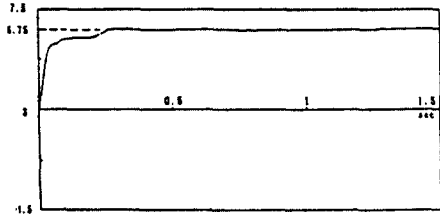
$$\alpha_{2max} = 7.5 \quad \alpha_{2min} = -1.5 \quad \alpha_2 = 6.75$$

$$\beta_{1max} = 15 \quad \beta_{1min} = 0 \quad \beta_1 = 1.5$$

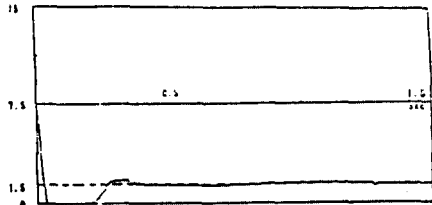
未知 파라메타의 同定結果는 그림. 2와 같다. 그림. 2(a), 그림. 2(b)와 그림. 2(c)는 각각 미지 파라메타 α_1 , α_2 와 β_1 의 同定狀況이다. 또, 그림. 2(a)는 軌道 制御의 追從誤差이다. 그림 2(d)에는 로버스트 制御 入力を 나타낸 것으로 同定方法의 有效性이 立證되었다. 즉, 分母의 未知 파라메타 β_1 이 存在하기 때문에 從來의 同定方法은 適用되지 않는다.



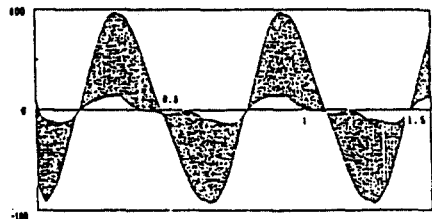
(a) Identification result of α_1 & Tracking error e



(b) Identification result of α_2



(c) Identification result of β_1



(d) Control input

그림2. on-line 동정에 의한 동정 결과

Fig 2. Identification results with the on-line identifier

Ⅲ. 線形 多入力 多出力系の on line 同定

上述한 同定方法을 多入力 多出力 시스템에 擴張할 수가 있다. 여기서 [假定 2]가 成立하는 것으로 해서 on line 同定法을 一般線形 多入力 多出力 시스템 $\Sigma(A, B, C)$ 에 適用한다. 즉, 시스템 全體에 관해서 로버스트 制御를 保證하면서 同定한다.

1. 同定對象의 記述

同定對象으로 하는 線形시스템 $\Sigma(A, B, C)$ 를 다음과 같이 記述한다.

$$\dot{x} = A(p)x + B(p)u \quad (18)$$

$$y = C(p)x \quad (19)$$

$$x \in R^n \quad u \in R^m \quad y \in R^r \quad A \in R^{n \times n} \quad B \in R^{n \times m} \quad C \in R^{r \times n}$$

여기서 入力벡터 u , 出力벡터 y , 狀態벡터 x 는 測定可能하다.

未知파라메터 p 를 갖는 C 매트릭스는 y 와 x 의 데이터를 利用하면 最小自乘法으로 推定할 수가 있다. 따라서 未知 파라메터 p 를 包含하는 매트릭스 A 와 B 의 同定에 관해서 考察한다. 未知 파라메타의 同定結果는 制御入力の 構成에 使用되므로 E 의 同定結果는 시스템의 로버스트性에 影響을 준다. 따라서 E 에 관해서 다음 假定이 必要하다.

[假定 1]

未知파라메터 매트릭스 E 에 관해서 曖昧함의 範圍가 既知로서

$$E_{min} \leq E \leq E_{max} \quad (21)$$

$$\forall E \in [E_{min}, E_{max}]$$

$$\lambda_{min}(1/2 E + 1/2 E^T) > -1 \quad (22)$$

$$\text{rank}(I + E) = m \quad (23)$$

가 成立한다.

2. 制御系の 構成

다음으로 多入力 多出力 시스템 $\Sigma(A, B, C)$ 의 파라메터 同定과 로버스트制御 構成에 관해서 記述한다. 制御目標에 對해서 超平面向을 다음과 같이 構成한다.

$$\sigma = G(x_d - x) = y_d - Gx \quad (24)$$

$$\sigma, y_d \in R^m \quad G \in R^{m \times n}$$

一般的으로 $\text{rank}(G) = m$, $\text{rank}(GB_0) = m$ 를 滿足하는 行列 G 를 選擇한다. On line 同定法 多入力 多出力 시스템에 擴張하는 경우 超平面向의 次元이 m 밖에 안되기 때문에, $n > m$ 의 境遇 매트릭스 A 의 同定이 不可能하다. 한편 로버스트 制御시스템의 折換幅을 줄이는 立場에서 보면 同定파라메타가 반드시 참값에 同定할 필요가 없다. 많은 制御問題에 있어서 未知파라메타의 組合을 同定하면 充分하다. 따라서, 未知파라메타 A 대신에 同定할 파라메타를 $\Psi = GA$ 와 같이 選擇한다. 未知파라메타 Ψ 와 E 의 同定에 관해 考察하자. 抑制入力は 두 部分 u_0 와 u_v 로 構成된다. u_0 는 同定을 위한 可調整 파라메타 $\hat{\Psi}(t)$ 와 $\hat{E}(t)$ 를 包含한 것이다. u_v 는 로버스트 制御를 實現

하는 것이다.

$$u = u_0 + u_v \quad (25)$$

$$u_0 = (GB_0 + \hat{\Psi})^{-1} (\dot{y}_d - GB_0 \hat{E}) \quad (26)$$

抑制 파라미터를 決定하기 위해 超平面(24) 微分에 (25)과 (26)을 代入하면

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \dot{y}_d - \Psi x - GB_0 u - GB_0 E u \\ &= \dot{y}_d - \Psi x - GB_0 (u_0 + u_v) - GB_0 E (u_0 + u_v) \\ &= \dot{y}_d - \Psi x - GB_0 (I + \bar{E}) - GB_0 (E - \bar{E}) u_0 \\ &\quad - GB_0 (I + E) u_v \\ &= (\hat{\Psi} - \Psi) x + GB_0 (\hat{E} - E) u_0 - GB_0 (I + E) u_v \end{aligned} \quad (27)$$

을 얻는다. 로버스트 制御入力の 形式과 制御 파라미터를 決定하기 위해서 正定테스트 函數를 擇한다.

$$V = \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma \sigma \geq 0 \quad (28)$$

여기서,
 $\text{sgn}(\sigma^T) : [\text{sgn}(\sigma_1), \dots, \text{sgn}(\sigma_m)]$

$$\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$$

이다. $\sigma \neq 0$ 이고 $d(\text{sgn}(\sigma^T))/dt = 0$ 인 것을 (9)를 이용해서

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma \dot{\sigma} \\ &= \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma (\hat{\Psi} - \Psi) x + \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma GB_0 (\hat{E} - E) u_0 - \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma GB_0 (I + E) u_v \end{aligned} \quad (29)$$

로 된다. 윗식에 의해서 다음과 같은 로버스트 制御入力を 選擇한다.

$$u_v = -\rho (GB_0)^T \Gamma \text{sgn}(\sigma) \quad (30)$$

制御利得 ρ 를 $\dot{V} \leq 0$ 이 되도록 決定하면 좋다. 간단히 하기 위해

$$\alpha = (GB_0)^T \Gamma \text{sgn}(\sigma) \quad (31)$$

로 한다. (30)과 (31)를 (29)에 代入해서 定理하면

다음 關係가 成立한다.

$$\begin{aligned} 2 \text{sgn}(\sigma^T) \Gamma (\hat{\Psi} - \Psi) x + 2\alpha^T (\hat{E} - E) u_0 - 2\rho \\ \alpha^T [I + 1/2 E + 1/2 E^T] \alpha \leq 2 \dot{V} \end{aligned} \quad (32)$$

制御利得 ρ 를 決定하기 위해 파라미터의 不確定性에 의해서 생기는 曖昧함의 變動範圍를 確認하는 것이 필요하다. 그렇기 위해 다음 單位 行벡터를 定義한다.

$$\begin{aligned} \nu_i &= [0, \dots, 0, \nu_i, 0, \dots, 0] \\ \nu_i &= 1 \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (33)$$

이제는 同定 파라미터(可調整 파라미터)를 既知變動範圍를 超過하지 않도록 調整하는 同定測을 利用한다. 따라서

$$-\nu_i \Psi^+ |x|_1 \leq \nu_i (\hat{\Psi} - \Psi) \times \nu_i \Psi^+ |x|_1 \quad (34)$$

$$-\nu_i E^+ |x|_1 \leq \nu_i (\hat{E} - E) \times \nu_i E^+ |x|_1 \quad (35)$$

가 얻어진다. $\Psi^+ \in R^{m \times m}$ 와 $E^+ \in R^{m \times n}$ 는 各要素가 다음과 같이 決定되는 매트릭스이다.

$$\Psi^+ = \{ \phi_{ij}^+ = | \phi_{ij\max} - \phi_{ij\min} | \} \quad (36)$$

$$E^+ = \{ e_{ij}^+ = | e_{ij\max} - e_{ij\min} | \} \quad (37)$$

여기서

$$\phi_{ij\max} = \sum_{k=1}^n g_{ik} a_{kj\max} \quad (38)$$

$$\phi_{ij\min} = \sum_{k=1}^n g_{ik} a_{kj\min} \quad (39)$$

$$i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, m$$

이다. $\sigma \neq 0$ 에 의해 $\alpha \neq 0$ 가 成立하고 (34)와 (36)의 關係 및 [假定 2], [假定 4]를 이용해서 制御 파라미터 ρ 를 다음과 같이 決定한다.

$$\rho = \frac{|\text{sgn}(\sigma^T) \Gamma \alpha \Psi^+| \times |1 + \alpha^T 1 E^+ u_0|_1}{(\alpha^T \alpha) [1 + \lambda_{\min}(1/2 E + 1/2 E^T)]} \quad (40)$$

(40)를 (32)에 代入하면 $V \leq 0$ 로 되는 것을 알 수 있다.

3. 同定測의 導出

여기서 새로운 파라메타 매트릭스

$$\Theta(t) = \hat{\Psi}(t) - \Psi \quad (41)$$

$$\Phi(t) = GB_0(\hat{E}(t) - E) \quad (42)$$

을 定義한다. 同定測을 求하기 위하여 다음 리아프노프 函數를 利用한다.

$$V = 1/2 \text{ trace } [(\Theta^T(t) \Gamma_A^{-1} \Theta^T(t) \Gamma_E^{-1}(t) \Theta(t)) \geq 0 \quad (43)$$

여기서 $\Gamma_A(t)$ 과 $\Gamma_E(t)$ 는 各各 正定對稱이고, 그 微分은 負定對稱인 同定利得 매트릭스이다. 윗식을 微分해서

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \text{trace } [\dot{\Theta}^T(t) \Gamma_A^{-1}(t) \Theta(t) + \dot{\Phi}^T(t) \Gamma_E^{-1}(t) \Phi(t)] \\ & + \text{trace } [\Theta^T(t) \dot{\Gamma}_A^{-1}(t) \Theta(t) + \Phi^T(t) \dot{\Gamma}_E^{-1}(t) \Phi(t)] \leq \text{trace } [\dot{\Theta}^T(t) \Gamma_A^{-1}(t) \Theta(t) \\ & + \dot{\Phi}^T(t) \Gamma_E^{-1}(t) \Phi(t)] \quad (44) \end{aligned}$$

을 얻는다. 한편, 로버스트 制御에 의해서 미끄럼狀態가 되기 때문에

$$\dot{\sigma} = \dot{y}_d - \Psi x - GB_0 u_{eq} - GB_0 E u_{eq} = 0 \quad (45)$$

에 의해서

$$\omega = \Theta x + \Phi u_{eq} = -\dot{y}_d + \hat{\Psi} x + GB_0(I + \hat{E}) u_{eq} \quad (46)$$

를 얻는다. 따라서 파라메타 調整測을

$$\dot{\Theta}(t) = \dot{\hat{\Psi}}(t) = -\Gamma_A \omega x^T \quad (47)$$

$$\dot{\Phi}^T(t) = GB_0 \dot{\hat{E}}(t) = -\Gamma_E \omega u_{eq}^T \quad (48)$$

로 택해서 (4.55)에 代入하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} V = & -\text{trace } [x \omega^T \theta(t)] - \text{trace } [u_{eq} \omega^T \Phi(t)] \\ = & -\omega^T (\theta(t)x + \Phi(t)u_{eq}) \leq -\omega^T \omega \leq 0 \quad (49) \end{aligned}$$

파라메타 調整測 (47)과 (48)을 積分型으로 고치고 可調整 파라메타의 變動 範圍 (21), (38), (39)를 同時에 고려하면 同定 알고리즘을 이제 다음과 같이 整理 할 수가 있다.

$$\hat{\phi}_{ij}(t) = \begin{cases} \phi_{ij\min} & \text{if } \hat{\phi}_{ij}(t) \leq \phi_{ij\min} \\ -\int_{t_0}^t \sum_{k=1}^m \gamma_{Ajk}(t) \omega_{kx_i} dt + \hat{\phi}_{ij}(t_0) & \\ \phi_{ij\max} & \text{if } \phi_{ij\min} < \hat{\phi}_{ij}(t) < \phi_{ij\max} \\ & \text{if } \hat{\phi}_{ij}(t) \geq \phi_{ij\max} \end{cases} \quad (50)$$

$$e_{ij}(t) = \begin{cases} e_{ij\min} & \text{if } \bar{e}_{ij}(t) \leq e_{ij\min} \\ -\int_{t_0}^t \sum_{k=1}^m \mu_{ik}(t) \omega_{ku_{eq}} dt + \bar{e}_{ij}(t_0) & \\ e_{ij\max} & \text{if } \phi_{ij\min} < \bar{e}_{ij}(t) < e_{ij\max} \\ & \text{if } \bar{e}_{ij}(t) \geq e_{ij\max} \end{cases} \quad (51)$$

$$\omega = GB_0 u_{eq} - \dot{y}_d + \phi_x + GB_0 E u_{eq} \quad (52)$$

$$u_{eq} = L_{av} [u] \doteq u_c + \rho (GB_0)^T [L_{av} [\text{sgn}(\sigma)]] \quad (53)$$

가 얻어진다. 여기서 $\gamma_{Aij}(t)$ 는 Γ_A 의 i 행의 j 열째 要素이다. $\mu_{ij}(t)$ 는 $(GB_0)^{-1} \Gamma_E$ 의 i 행 j 열째 要素이다. 一般的으로 同定 gain行列 Γ_A 와 Γ_E 를 對角으로 擇하면 시스템 同定에 대하여 만약 理想的인 sliding Mode가 發生하면 上述한 로버스트 制御 方法과 同定 方法에 의해서 可調整 파라메타는 漸次的으로 참 값에 收斂된다.

$$\hat{\Phi}(t) \rightarrow \Phi \quad \hat{E}(t) \rightarrow E \quad (54)$$

IV. 多關節 로봇 팔에 適用

未知 파라메타의 變動範圍가 커지면 (曖昧함이 增大하면) 로버스트 制御法의 缺點 (에너지의 消費問題)이 두드러진다. 특히 시스템의 狀態가 超平面의 近方에 있을때 심한 채터링 現狀이 생긴다. 이와같은 問題에 대해서, 區分되는 函數 (예를들면 飽和 函數)

나 연속函數를 超平面에 導入해서 어느정도까지 채터링現象을 줄일 수 있다. 그러나 그에 反해서 로버스트性도 낮아진다. 따라서 同定方法으로 未知 파라메터를 推定해서 制御對象의 曖昧함을 없애고 로버스트性을 잃지 않는 狀況下에서 饋還補償을 實現하는 것이 要望된다. 이미 證明했듯 可變構造系의 채터링 制御入力로부터 檢出하는 情報에 基礎해서 同定모델을 利用하지 않고 未知 파라메터가 同定된다. 여기서, 이 同定方法을 2軸 로보트 팔에 適用해서 그 有效性을 立證한다.

1. 2軸 팔의 可同定 形式

2軸 로보트 팔의 構造를 그림 3에 나타냈다. 表 1은 各 關節의 파라메터를 나타냈다. 上述한 同定方法을 適用하기 위해 로보트팔의 動力學을 可同定 形式으로 變形한다. 우선, 로버스트 制御系에 의한 Sliding Mode가 存在할때, 等價制御法에 의해 다음 關係를 求할 수가 있다.

$$R(q, p)\ddot{q} = R(q, p)[\ddot{\sigma} - \ddot{q}_d - \dot{C}_e] \quad (55)$$

$$= M(q, p)\xi + f(p)\dot{q} + g(q, p) + \tau_{eq}$$

표1. 두 링크의 물리 파라메타
Table 1. Physical parameters of two linkage

Link	m_i	L_i	a_i	I_i
No.	(kg)	(m)	(m)	(kg·m ²)
1	25	1	0.4	2
2	10	0.5	0.2	1

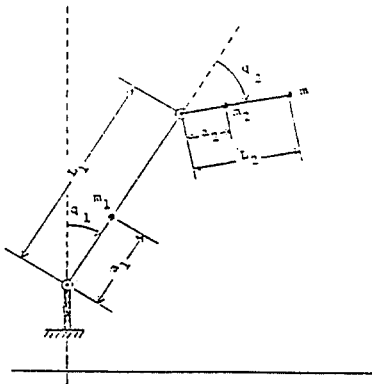


그림3. 자유도 로보트 매니플레이터.
Fig 3. Robot manipulator with 2 D.O.F.

윗식에서 未知 파라메터 P를 包含계수 매트릭스 $\Phi(p)$ 와 狀態變數 벡터 P로 부터 되는 比線形項과 分離가 되기 때문에 다음과 같이 代數方程式으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{n_1} \phi_{ij} \omega_{ij} = \tau_{ieq} \quad (56)$$

$$\phi_{ij} = \phi_{ij}(p) \quad (57)$$

2軸 로보트팔에 있어 $i=2$ 이고, n_1 은 ϕ_{ij} 의 구하는 方法에 의해 決定된다. 후에 나타난 바와 같이 $n_1=3, n_2=2$ 이다. 식(56), (57)은 可同定 形式이라 부른다. 또 p의 可動範圍를 미리알면, Φ_{ij} 의 變動範圍를 간단히 計算할 수 있다.

$$\phi_{ijmin} \leq \hat{\phi}_{ij}(p) \leq \phi_{ijmax} \quad (58)$$

2. 同定機構의 構成

上述한 同定方法에 의해 다음 同定器가 求해진다.

$$\hat{\phi}_{ij}(t) = \begin{cases} \phi_{ijmin} & \text{if } \hat{\phi}_{ij}(t) \leq \phi_{ijmin} \\ \int_{t_0}^t k(t) \omega_{ij} dt + \hat{\phi}_{aj}(t_0) & \text{if } \phi_{ijmin} < \hat{\phi}_{ij}(t) < \phi_{ijmax} \\ \phi_{ijmax} & \text{if } \hat{\phi}_{ij}(t) \geq \phi_{ijmax} \end{cases} \quad (59)$$

$$d_i = -\sum (\phi_{ijmax} - \phi_{ijmin}) |\omega_{ij}| L_{av}(s_i) \quad (60)$$

여기서 積分器와 低域필터 L_{av} 는 STM요소s의 役割을 $k(t)$ 는 忘却要素이다.

3. 可調整 파라메터의 選定

未知 파라메터 p로부터 ϕ_{ij} 를 정할때 ϕ_{ij} 는 될 수 있는대로 크게, 또한 ϕ_{ij} 로부터 역으로 未知 파라메터 p를 求하는것 같은 파라메터 表現이 要望된다. 2軸 로보트팔의 構造로부터 可調整 파라메터 $\phi_{ij}(t)$ 를 다음 3개로 澤한다.

$$\begin{aligned} \phi_1(t) &\rightarrow m_v \\ \phi_2(t) &\rightarrow (m_2 + m_v) s_2 \\ \phi_3(t) &\rightarrow (m_2 + m_v) s_2^2 + I_2 \end{aligned} \quad (61)$$

m_v : 負荷 S_2 : 링크2의 中心位置 I_2 : 링크2의 慣性

質量이 3개의 係數에서 2軸 로봇트팔의 여러 未知 파라메터 包含部를 마지막으로 表現하고 있다.

4. 制御入力の 決定

制御入力は 다음과 같이 定한다.

$$u_1 = \omega_0 + \phi_1(t)\omega_1 + \phi_2(t)\omega_2 + \phi_3(t)\omega_3 + (\phi_{d1}|\omega_1| + \phi_{d2}|\omega_2| + \phi_{d3}|\omega_3| + h_1)\text{sgn}(s_1) \quad (62)$$

$$u_2 = \phi_2(t)\omega_4 + \phi_3(t)\omega_3 + (\phi_{d2}|\omega_4| + \phi_{d3}|\omega_3| + h_2)\text{sgn}(s_2) \quad (63)$$

여기서 $\phi_{di} = \phi_{imax} - \phi_{imin}$ ($i=1,2,3$), h_i 은 加速度의 補償項이다. 즉, 非線形項 ω_i 은 未知情報(事前情報 + 測定情報)에 의해서 計算으로 얻어진다. 예를 들면

$$\omega_1 = L_1^2 q_{1d} + L_1^2 c_1 e_1 - 9.8 L_1 \sin q_1 \quad (64)$$

5. 同定器信號의 充分條件

同定理論에 의해 未知 파라메터가 n 개로 되는 境遇에 同定用 信號의 周波數 成分은 $\text{int}(n/2) + 1$ 개 必要하다. 그러나 一般的으로 로봇트팔의 目標軌道는 作業內容에 의해 決定되기 때문에 반드시 充分條件을 滿足해야하는 限界는 없다. 여기서 로봇트팔의 構造에 着眼하면 可調整 파라메터가 참값에 收斂하는 必要充分條件은 ω_i 이 서로 獨立인 것이다. 이것은 Sliding Mode가 存在하는 境遇에 ω_i 의 非線形性에 의해 容易하게 保證된다. 여기서, 링크 1의 目標軌道는 1개의 周波數 成分 밖에 없다고 해도 3개의 파라메터가 同定된다.

6. 파라메터 同定實現

로봇트팔의 負荷는 0kg ~ 10kg까지로 한다. 그러면 $\Phi_2(t)$ 와 $\Phi_3(t)$ 의 變動範圍는 각각 [2, 7]과 [1, 4.3]으로 된다. 즉, 負荷 m_v 의 基準值를 5kg으로 한다. 그림 4에서는 負荷 $m_v = 9\text{kg}$ 의 境遇 同定結果를 그림 5에서는 負荷 $m_v = 0.5\text{kg}$ 의 境遇 同定結果를 各各 나 타내 本 同定方法의 有效性이 立證되었다.

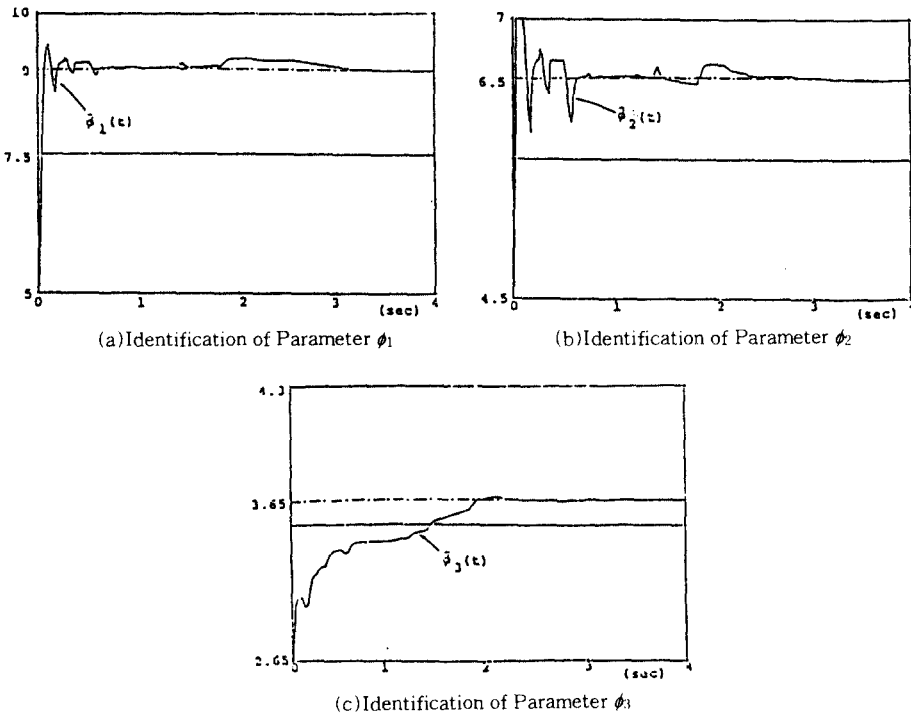


그림 4. 부하가 9kg일때 파라메타 동정
Fig 4. Parameter Identification with payload $m=9\text{kg}$

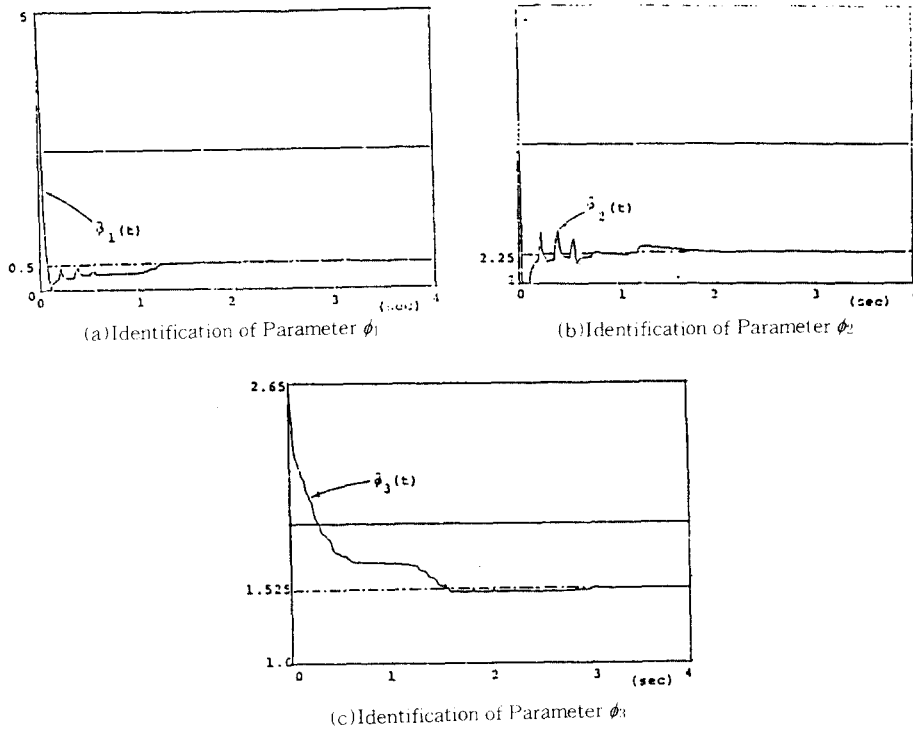


그림5. 부하가 0.5kg일때 파라메타 동정
 Fig. 5. Parameter Identification with payload $m=0.5\text{kg}$

V. 結 論

本 論文에서는 制御對象의 모델이 正確하게 記述 되지 않을때 曖昧함이 未知 파라메타의 形態로 나타나는 境遇에 대하여 未知 파라메타를 同定하는 技法에 대하여 研究하였다. 특히 로봇 매니플레이터의 制御에 있어 負荷의 變動이 없을 경우 많은 制御技法들이 研究되어 졌으나 負荷의 變動이 있을때 既存의 技法으로는 빠른 同定結果를 얻을 수 없었다. 따라서 本 論文에서 提案한 同定알고리즘을 制御器에 添加하여 보다 빠른 同定을 함으로써 效果的인 制御性能을 나타내었음을 模擬實驗을 통하여 立證하였다. 一般的으로 既存의 同定技法은 OFF Line에 의한 同定으로 파라메타를 同定하는데 많은 시간이 必要하였으나 本 研究에서는 實時間 處理를 위한 ON LINE同定技法을 提案하여 未知 파라메타를 同定하여 制御器의 실시간 處理가 可能함을 模擬實驗을 통하여 確認하였다.

참 고 문 헌

1. M.M.Gupta, G.N.Ragade, and R.R.Yager "Advances in Fuzzy Set Theory and Applications" (edited), New York-Oxford, 1979.
2. V.I.Utkin "Variable Structure Systems with Sliding Mode," IEEE Trans. on AC, Vol.AC-22, pp.212-222, 1977.
3. 相良他 "시스템同定," 計測自動制御學會, 1981.
4. G.Luders and K.S.Narendra "An Adaptive Observer and Identifier for a Linear System," IEEE Trans. on AC, Vol.AC-18-5, pp.496-499, 1973.
5. 岩井他 "オブザーバ," コロナ社, 1988.
6. 杉江他 "學習制御에 關する一考察," 시스템と制御, Vol.31, No.2, pp.129-135, 1987.
7. D.E.Rumelhart, J.L.McClelland, et al "Parallel Distributed Processing," MIT Press, 1986.

8. 原島・橋本 “Sliding Mode とその應用-I.” システムと制御, Vol.29 No.2, pp.94-103, 1985.
9. 原島・橋本 “Sliding Mode とその應用-II.” システムと制御, Vol.29 No.4, pp.242-250, 1985.
10. K.S.Narendra et al “Application of Adaptive Control,” Academic Press, Inc. 1980.
11. 川村他 “學習制御方式のシステム論的考察,” 計測自動制御學會論文集, Vol.21, No.5, pp.445-450, 1985.
12. 橋本 “可變構造系による制御系の設計,” 博士學位論文, 1987.
13. F.Harashima, Jianxin Xu, H.Hahimoto “Tracking Control of robot Manuplators Using Sliding Mode,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.PE-2, No.2, pp.169-176.
14. Jianxin Xu, H.Hashimoto et al “Implementation of VSS Control to Robotic Manipulators--Smoothing Modification--,” accepted for publication on IEEE Trans on Industrial Electronics.
15. V.I.Utkin “Sliding Modes and Their Application to Variable Structure System,” Mir Moscow, 1978.
16. 原島, 許, 橋本 “VSSによる非線形系のパラメータ同定,” 第24回 SICE學術講演會, pp.795-796, 1985.
17. F.Harashima, Jianxin Xu, Hashimoto “Parameter Identification Using VSS,” 8th SICE Symposium on Dynamical System Theory, pp. 35-38, 1985.
18. F.Harashima, Jianxin Xu, “Parameter Identification of a Two-linkage Robot Manipulator Using VSS,” 25th SICE Annual Conference, 1986.7, pp.983-986.
19. H.Asada, J.J.E.Slotine “Robot Analysis and Control,” John Wiley and Sons, 1986.
20. G.Ambrosino, G.Celentano, F.garofalo “Variable Structure Model Reference Adaptive Control Systems,” Int.J. Control Vol.39, No.6, pp.1339-1349, 1984.



鄭相根(Sang Keun Chung) 正會員
 1950年1月26日生
 1971年2月光云大學 通信工學科 卒業
 1975年2月: 延世大學校産業大學院
 電子工學科 卒業
 1990年2月: 慶熙大學校 大學院 電子
 工學科 博士課程修了
 1977年~現在: 安養專門大學 電子
 計算科 教授

朴鍾國(Chong Kug Park) 正會員
 第15卷 第8號 參照