'92 韓國自動制御學術會議論文集 1992. 10. 19~21

가변구조이론에 의한 파라미터 Identificatin 알고리즘

심 귀보*, 한 동균**, 전 홍태**
* 중앙대학교 제어계측공학과
** 중앙대학교 전자공학과

On Parameter Identification Algorithm using VSS Theory

Kwee-Bo Sim*, Dong-Gyun Han**, and Hong-Tae Jeon**
* Dep. of Control and Instrumentation Eng.
** Dep. of Electronic Engineering
Chung-Ang University

Abstract :

VSS identification approach is based on following concept, i.e. while in sliding motion, the switching of control inputs reflects system uncertainties. Therefore, if there exist some operations that make the information from the switching control inputs be achievable, then the unknown parameters can be actually identified as far as it is capable of selecting suitable identification mechanisms which can fully make use of the available information.

Two different types of VSS identifiers are taken into consideration. The first type uses adjustable model whose structure is similar to that of identified systems. From the viewpoint of control, this type of VSS identifiers may be regarded as direct identifier because the identified system is handled as an open loop. On the other hand, if the identified system is controllable in the sense of VSS(sliding mode can be generated through chosing control inputs), the second type of VSS identifier, the indirect VSS identifier, can be constructed according to the linearized system structure while staying in sliding mode. Therefore it can be applied to some nonlinear systems which are not linear in parametric space by general identification algorithms, whereas linear in parametric space when sliding mode is existed.

1. Introduction

가변구조계(Variable Structure System : VSS)라고 하는 것은 시스템에 스위칭 제어 입력을 가하여 상태를 슬라이딩 평면상에 구속하는 시스템이다. 제어대상의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속함으로써 잡음, 비선형성, 파라메터 부정합등에 강한 시스템을 구성할 수 있어서 그 응용 범위가 다양하다.

본 논문에서는 VSS를 이용한 구체적인 제어법은 피하고, 제어대상의 정보를 찾기위한 VSS의 사용법에 대해 서술한다. 실용면에서 VSS를 응용하기 위해서는 채터링(chattering)이라는 난점이 있다. 제어입력의 스위칭에 의한 채터링은 제어대상의 하드웨어에 대해서 물리적 손상을 야기시킨다. 그러나 대상을 신호처리로 한정하면 그러한 실제의 물리적 현상에 대해서는 무관계하기 때문에 VSS의 특징인 강한 강인성을 가지는 시스템을 구성할 수 있다.

본 논문에서는 VSS를 identifier로서 신호처리에 이용한 경우의 이론전개를 서술한다.

2. VSS Identifier

VSS의 특징으로는 (1)high-gain, (2)제어입력의 채터링 등의 두가지를 들 수 있다. VSS제어에서는 (1)의 high-gain에 의한 강인성이 강한 시스템을 구성하는 것이 메인이고, (2)의 채처링은 하드웨어에 악영향을 미칠 뿐이다. 그러나 VSS를 사용한 신호처리의 경우, 이 채터링을 유효하게 사용하여 시스템 정보를 얻는 것이다. 즉, 슬라이딩 평면상에 있는 시스템의 스위칭 제어입력은, 제어대상으로 되어 있는 시스템의 애매함 (잡음, 비선형성, 미지 파라메터의 존재, 파라메터의 부정합)을 어떠한 형태로 반영한다고 생각할 수 있다. 따라서 어떤 조작을 이용하여 스위칭 제어입력으로부터 제어에 유용한 정보를 끄집어 내어 그 정보를 사용하여 적당한 estimator나, identifier를 구성할 수 있다.

이하에서는 스위칭 제어입력에 의해서 얻어진 정보를 사용한 두종류의 파라메터 identification 수법에 대해 설명한다. 첫번째는 일반적인 identifier와 동일하게 identified system을 open-loop로 취급하는 것이다. 이와 같은 수법을 Direct Identification이라 부른다. 두번째의 수법은 VSS에 의해 구성된 제어계에 적용되어, 제어계의 스위칭 입력을 이용하여 새로운 VSS를 사용한 Indirect Idebtification을 구성하는 수법이다. 파라메터 공간에 있어서는 선형성이 성립되지 않기 때문에 일반적인 수법으로는 identification이 곤란한 비선형 시스템에 대해서, VSS에 의한 제어를 행하여 identified system을 초평면에 구속함으로 해서 선형화가 가능하다.

그러므로 선형화한 파라메터 공간에 있어서 종래에는 불가능 했던 identification이 가능하게 되는 것이다. 이 identifier를 사용하여 강인성이 높은 새로운 적응제어법을 구성할 수 있다.

3 VSS Based Direct Identification

본 절에서는 (1) 과 (2)식에 나타낸 一入力一出力(SISO) 고차 비선형시스템을 identification 대상으로 한다. 대상으로 하는 시스템은 미지 파라메터 공간 p와 비선형항의 선형분리가 가능한 것으로 가정한다.

$$\dot{x}_i = x_i + 1 \quad (i = 1, \cdots, n-1) \tag{1}$$

$$\dot{x}_n = \rho(x, p, t) + \lambda(x, p, t)u \tag{2}$$

여기서 비선형함수 ρ와 λ는 다음 가정을 만족시키는 것이다.

【Assumption 1】

비선형함수 ρ와 λ는

$\rho(x,p,t) = \theta^T(p)\xi(x,t)$

$\lambda(x,p,t) = \phi^T(p)\eta(x,t)$

$\theta^T = [\theta_1, \cdots, \theta_{n1}] \quad \phi^T = [\phi_1, \cdots, \phi_{n2}]$

$\xi^T = [\xi_1, \cdots, \xi_{n1}] \quad \eta^T = [\eta_1, \cdots, \eta_{n2}]$

이다. 단,

$\xi_i = \xi_i(x,t) \quad \eta_i = \eta_i(x,t)$

는 기지의 비선형함수이며,

$\theta_i = \theta_i(p) \quad \phi_i = \phi_i(p)$

는 미지 파리메터 p를 포함하는 계수의 조합이다. 또 n_1과 n_2는 각각 파라메터 벡터의 θ 와 ϕ의 차원이다. □

(2)식을 다음과 같은 형태로 바꾼다.

$$\dot{x}_n = \alpha(p)^T\zeta(x,u,t) \tag{3}$$

$$\alpha = [\theta^T \ \phi^T]^T \tag{4}$$

$$\zeta = [\xi^T \ \eta^T u]^T \tag{5}$$

일반적으로 미지 parameter p가 존재하기 때문에 벡터 $\theta(p)$와 $\phi(p)$의 정확한 값은 알 수 없다. 단, p에 관한 사전 정보 $P = \{p | p_{min} \le p \le p_{max}\}$가 주어지면, 【Assumption 2】에서 주어진 것과 같이 벡터 $\theta(p)$와 $\phi(p)$의 요소의 상한과 하한을 확정할 수가 있다.

【Assumption 2】

$\forall p \in P$

$\theta_{imin} \le \theta_i(p) \le \theta_{imax} \qquad \phi_{imin} \le \phi_i(p) \le \phi_{imax}$

$\theta_{imax} = \max_p \theta_i(p) \qquad \theta_{imin} = \min_p \theta_i(p)$

$\phi_{imax} = \max_p \phi_i(p) \qquad \phi_{imin} = \min_p \phi_i(p)$ □

3.1 Dircet Identification Algorithm 1

◎ Identification Model

미지 벡터 $\alpha(p)$에 대해서 identification Model을 다음과 같이 구성한다.

$$\dot{\hat{x}}_i = \hat{x}_{i+1} \quad (i = 1, \cdots, n-1) \tag{6}$$

$$\dot{\hat{x}}_n = \hat{\alpha}^T(t)\zeta + \upsilon \tag{7}$$

여기서 $\hat{\alpha}(t)$는 조정가능한 parameter이다. υ는 다음과 같이 구성된 identication을 위한 입력이다.

$$\upsilon = \upsilon_c + \upsilon_v \tag{8}$$

$$\upsilon_c = \sum_{i=1}^{n-1} h_i(x_{i+1}(t) - \hat{x}_{i+1}(t)) \tag{9}$$

$$\upsilon_v = d^T|\zeta|_1 sgn(\sigma) \tag{10}$$

여기서 h_i는 Hurwitz 다항식이고, d는 다음식에서 정의한 벡터이다.

$$d^T = [d_1, \cdots, d_{n1}, d_{n1+1}, \cdots, d_{n1+n2}] \tag{11}$$

$$d_i = \begin{cases} |\theta_{imax} - \theta_{imin}| & i = 1, \cdots, n1 \\ |\phi_{imax} - \phi_{imin}| & i = n1+1, \cdots, n1+n2 \end{cases} \tag{12}$$

또, 초평면 σ는 다음과 같이 선택한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} h_i(x_i(t) - \hat{x}_i(t)) \quad (\text{단, } h_n = 1) \tag{13}$$

◎ Convergence of the Identifying Algorithm

다음 정리에 의해 「Direct Identification Algorithm 1」의 유효성을 알 수 있다.

【Theorem 1】

비선형함수로부터 이루어진 신호 vector

$$\zeta = [\xi^T \ \eta^T u]^T \tag{14}$$

가 선형독립이고, 이상적인 Sliding Mode가 발생하고 있는 상태라면, identification parameter는 이하의 identifier에 의해 참값에 근사적으로 수렴한다.

조정가능 parameter $\hat{\alpha}(t)$는 identifier의 출력이다.

$$\hat{\alpha}_i(t) = \begin{cases} \alpha_{imin} & (\hat{\alpha}_i(t) \le \alpha_{imin}) \\ \hat{\alpha}_i^0(t) & \hat{\alpha}_i^0(t) \in (\alpha_{imin}\ \alpha_{imax}) \\ \alpha_{imax} & (\hat{\alpha}_i(t) \ge \alpha_{imax}) \end{cases} \tag{15}$$

$$\hat{\alpha}_i^0(t) = \int_{t0}^{t} k(t)\zeta_i\omega ds + \hat{\alpha}_i(t_0) \quad (i = 1, \cdots, n1+n2)$$

$$\omega = \upsilon_{eq} - \upsilon_c \tag{16}$$

여기서 υ_{eq}는 등가제어입력이고, $k(t)$는 적당한 양의 정치함수이다.

3.2 Direct Identification Algorithm 2

비선형 신호 벡터의 선형독립조건 ζ가 만족될 경우, 이론상으로는 $[\zeta\ \zeta^T]^{-1} \neq 0$ 이기 때문에 다음에 주어진 「Direct Identification Algorithm 2」를 사용하여 보다 엄밀한 수렴성을 얻을 수 있다.

【Theorem 2】

비선형함수로부터 이루어진 신호 vector ζ가 선형독립이고, 또 이상적인 Sliding Mode가 발생하고 있을 때, 다음과 같은 동정기를 구성할 수 있다.

$$\hat{a}_i(t) = \begin{cases} a_{imin} & \hat{a}_i^0(t) \leq a_{imin} \\ \hat{a}_i^0(t) & \hat{a}_i^0(t) \in (a_{imin}\ a_{imax}) \\ a_{imax} & \hat{a}_i^0(t) \geq a_{imax} \end{cases} \quad (17)$$

$$\hat{a}^0(t) = \int_{t0}^{t} \Gamma(s)|\zeta\zeta^T|^{-1}\zeta\omega ds + \hat{a}(t_0) \quad (18)$$

$$\hat{a}_i(0) = \frac{1}{2}(a_{imax} + a_{imin}) \quad i = 1, \cdots, n1+n2 \quad (19)$$

$$\omega = v_{eq} - v_c \quad (20)$$

여기서 Γ는 그 성분 $\gamma_i(t) > 0$ 인 대각행렬이다.

3.3 Direct Identification Algorithm 3

위에서 기술한 두가지 identification algorithm은 조정가능 parameter에 상하한이 가해져 있기 때문에 identification 알고리즘이 복잡해 졌다. 또 알고리즘 2의 (18)식에서는 상당히 큰 역행렬을 풀 필요가 있고, 거기서의 계산오차가 문제시되기 쉽다. 이 문제를 해결하기 위해서 다음의 identification algorithm을 생각한다.

【Theorem 3】

비선형함수로부터 이루어진 신호 vector ζ가 선형독립이고, 또 이상적인 Sliding Mode를 발생시키는 것이 가능하면, 다음의 Idenfication Model을 구성할 수 있다.

$$\dot{x}_i = \hat{x}_{i+1} \quad (i = 1, \cdots, n-1) \quad (21)$$

$$\dot{x}_n = a_0^T\zeta + v \quad (22)$$

여기서 $a_0 = \frac{1}{2}(a_{max} + a_{min})$ 이고, v는 (8)(9)(10)에서 주어진다.

Identification 방법을 다음과 같이 선택한다.

$$\dot{a}(t) = \Gamma\zeta\omega \quad (23)$$

$$\hat{a}_i(0) = \frac{1}{2}(a_{imax} + a_{imin}) \quad (24)$$

$$i = 1, \cdots, n1+n2$$

$$\omega = v_{eq} - v_c - \hat{a}^T\zeta \quad (25)$$

v_{eq}는 등가제어 입력이고 $\Gamma=\Gamma^T > 0$ 이다. 이 identifier를 사용할 경우에 조정가능 parameter는 점근적으로 참값에 수렴한다.

4. VSS Based Indirect Identification

본절에서는 feedback을 가지고 있는 간접 VSS identification을 나타낸다. 단, 이 수법이 성립하기 위해서는 시스템이 VSS이고, 동시에 可制御(controllability)이어야 한다.

4.1 Description of Identified Systems

여기에서도 앞절과 같이 식(1)(2)에서 기술된 一入力一出力 고차 비선형시스템을 대상으로 한다. 비선형함수 ρ와 λ는 【Assumption 1】【Assumption 2】를 만족하는 것으로 한다. 그리고 다음의 가정을 설정한다.

【Assumption 3】

시스템 (1),(2)에 있어서 어떤 양의 정수 r이 존재하고, 비선형항 λ는

$$\lambda(x,p,t) = \lambda' + \lambda''(x,p,t) \quad (26)$$

$$\forall t \in R^+ \quad \forall x \in D^+ \subset R^n \quad \forall p \in P$$

$$\exists r > 0,\ r + \max_{x,p,t}|\lambda''(x,p,t)| \leq |\lambda'| \quad (27)$$

이다. 이때 λ는 既知이다. D^T는 주어진 $n+1$차 미분까지 연속인 목표궤도 $x_d(t)$에 대해서 해가 유일하게 존재하는 비선형계 (21),(22)식의 상태영역이다. 이상의 가정은 비선형시스템 (21),(22)식을 VSS로 제어할 수 있기 위한 충분조건이다. □

이때 식(22)는

$$\dot{x}_n = a^T(p)\zeta(x,u,t) + \lambda' u \quad (28)$$

이 된다.

4.2 VSS Based Indirect Identifier

우선 초평면 σ를 다음과 같이 선택한다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} h_i(x_{di}(t) - x_i(t)) \quad (단,\ h_n = 1) \quad (29)$$

$x_{di}(t)$는 목표값이고, 제어입력을 아래와 같이 구성한다.

$$u = u_c + u_v \quad (30)$$

$$u_c = (v - \hat{\theta}^T(t)\xi)(\lambda' + \hat{\phi}^T(t)\eta)^{-1} \quad (31)$$

$$u_v = d^T|\zeta|_1 sgn(\lambda' \sigma)/r \quad (32)$$

여기서

$$v = \dot{x}_{dn} + \sum_{i=1}^{n-1} h_i(x_{di+1} - x_{i+1}) \quad (33)$$

이다. 또한 vector d는 (11),(12)에서 정의된 것이다.

4.3 Indirect Identification Algorithm 1,2,3

Direct Identification Algorithm 1,2,3에 대응하여 아래의 Assumption 4,5,6을 얻을 수 있다.

【Theorem 4】

비선형함수로부터 이루어진 신호벡터 ζ

$$\zeta = [\xi^T \ \eta^T u] \tag{34}$$

가 선형독립이고, 이상적인 Sliding Mode가 발생하고 있는 상태이면, identification 파리메터는 아래의 identifier에 의해 참값에 점근적으로 수렴한다. 조정가능 parameter $\hat{a}(t)$는 identifier의 출력이다.

$$\hat{a}_i(t) = \begin{cases} a_{i\min} & (\hat{a}_i(t)' \le a_{i\min}) \\ \hat{a}_i^0(t) & \hat{a}_i^0(t) \in (a_{i\min}\ a_{i\max}) \\ a_{i\max} & (\hat{a}_i(t) \ge a_{i\max}) \end{cases} \tag{35}$$

$$\hat{a}_i^0(t) = \int_{t0}^{t} k(s)\zeta_i\omega ds + \hat{a}_i(t_0) \qquad (i = 1, \cdots, n1+n2)$$

$$\omega = v_{eq} - \hat{a}^T(t)\zeta - \lambda' u_{eq} \tag{36}$$

여기서 v_{eq}는 등가제어입력이고, $k(t)$는 적당한 양의 정치함수이다.

【Assumption 5】

Assumption 4와 같은 조건하에서 아래의 identifier를 구성할 수 있다.

$$\hat{a}_i(t) = \begin{cases} a_{i\min} & \hat{a}_i^0(t) \le a_{i\min} \\ \hat{a}_i^0(t) & \hat{a}_i^0(t) \in (a_{i\min}\ a_{i\max}) \\ a_{i\max} & \hat{a}_i^0(t) \ge a_{i\max} \end{cases} \tag{37}$$

$$\hat{a}^0(t) = \int_{t0}^{t} k(s)\zeta\omega ds + \hat{a}(t_0) \tag{38}$$

$$\hat{a}_i(0) = \frac{1}{2}(a_{i\max} + a_{i\min}) \quad i = 1, \cdots, n1+n2 \tag{39}$$

$$\omega = v_{eq} - \hat{a}^T(t)\zeta - \lambda' u_{eq} \tag{40}$$

여기서 Γ는 그 성분 $\gamma_i(t) > 0$ 인 대각행렬이다.

□

【Assumption 6】

Assumption 4,5와 같은 조건하에서 아래의 identifierm를 구성할 수 있다.

$$\dot{\hat{a}}(t) = \Gamma\zeta\omega \tag{41}$$

$$\hat{a}_i(0) = \frac{1}{2}(a_{i\min} + a_{i\max}) \tag{42}$$

$$i = 1, \cdots, n1+n2$$

$$\omega = v_{eq} - \hat{a}^T(t)\zeta - \lambda' u_{eq} \tag{43}$$

이 identifier를 사용할 때에 조정가능 parameter는 점근적으로 참값에 수렴한다.

5. Conclusion

본 논문에서는 VSS에 의한 「Direct Identification」과 「Indirect Identification」에 대해서 서술했다. 또 이 identification method들의 적용범위까지 고찰했다. 아울러 제안된 identifier는 간단하게 多入力多出力系로 확장할 수 있으므로 공학적인 응용에 크게 기대할 수 있다. 앞으로의 과제로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- VSS의 耐noise性
- 이산화에 따르는 VSS의 스위칭 문제
- 등가제어입력과 평균제어입력의 관련

Reference

[1] V.I.Utkin, "Sliding Mode and Their Application in Variable Structure Systems", Mir, Moscow, 1978.

[2] F.Harashima et al, "Parameter Identification Using VSS", The 8th SICE Symposium on Dynamical System.

[3] M.S.Srewal, K.Glover, "Identifibility of Linear and Nonlinear Dynamical Systems", IEEE Tran. on Automatic Control Voi.AC-21, No.12, pp.833-837.