□ 技術解說 □

적응제어의 현황과 과제

梁 海 元*

차 례

1. 적응제어의 기본 목적

적응이란 사전에 "생물이 외계의 변화에 따라 생존에 적합하게 변화하는 일"로 설명되어 있는 것처럼 인간의 일상생활에서 널리 쓰여지고 있는 개념중의 하나이다. 따라서 적응 제어도 그 의미는 쉽게 類推될 수 있겠지만 아직 연구자들간에 합의된 정의는 없는 것으로 되어 있으므로 필자 나름대로 그 의의를 고찰해 보기로 한다.

원래 제어의 대상이 되는 대부분의 물리적 시스템은 비선형시변시스템이지만 편의상 선형시불변시스템으로 근사화하여 제어를 실시하고 있다. 그러나 근사화한 시스템의 수학적 모델이란 물리적인 법칙에 의해 얻어질 수 있는 경우도 있겠지만, 그렇지 못한 경우가 대부분이므로 이러한 때에는 입·출력데이타를 가지고 identification에 의해 구할 수 밖에 없다. 이렇게 구해진 수학적 모델을 갖고 적절한 controller를 구성하게 되겠지만, 만일 시스템의 동작조건이 바뀌던가 혹은 aging effect에 의해 특성이 변화하는 경우에는 다시 identification과 controller 구성을 하지 않으면 안된다. 그렇지만 그러한 변화가 언제 일어날지 알 수 없으므로 우리는 끊임없이 identification과 controller 구성을 실행하므로서 보다 안전하고 효율적인 제어시스템의 운용을 기대할 수 있을 것이며 이것이 바로 적응제어의 기본 취지이다.

적응에어의 방법에는 여러 가지가 있지만 여기서는 과거 수년간 주목을 받아온 Self-Tuning Regulator(STR)과 Model Reference Adaptive Control(MRAC)에 관하여 그 연구 현황을 소개하고 앞으로의 과제를 지적하기로 한다.

2. STR과 MRAC

2.1 STR

이것은 1973년에 Sweden의 Åström[1]의 연구그룹에 의해 제안되고 광범위하게 연구되어 온 것으로 그 개요는 다음과 같다.

離散시간 확률 시스템

$$A(z^{-1})\,y(k)=B(z^{-1})\,u(k-d)+\lambda C(z^{-1})\,e(k) \qquad (1)$$

단,

* 正会員 : 明知大学 電気工学科 助教授

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \cdots\cdots + a_n z^{-n}$$
$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots\cdots + b_n z^{-n} \qquad (2)$$
$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \cdots\cdots + c_n z^{-n}$$

$y(k)$; 출력

$u(k)$; 입력

$e(k)$; independent normal (0, 1) 확률변수에 대하여 minimum variance control law[2] 는

$$B(z^{-1})\ F(z^{-1})\ u(k) = -G(z^{-1})\ y(k) \qquad (3)$$

으로 주어지며, 이 때 $F(z^{-1})$와 $G(z^{-1})$는

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})\ F(z^{-1}) + z^{-d}\ G(z^{-1}) \qquad (4)$$

를 만족하는 각각 z^{-1}의 $d-1$, $n-1$차 다항식이다. 또한 이 시스템의 regulation 오차는

$$y(k) = \lambda F(z^{-1})\ e(k) \qquad (5)$$

가 된다.

만일 시스템 (1)의 파라메타의 값을 알고 있는경우에는 위와 같은 방법으로 간단히 controller를 구성할 수 있으나, 未知의 경우에는 먼저 그 파라메타의 값을 최소자승법 등으로 identify한 후에 구해진 파라메타를 바탕으로 controller를 구성하는 것이 바로 STR이다. 그러나 실제로 알고지즘을실현할 경우에는 (4)식의 중간 단계를 거치지 않고 직접 (3)식의 controller 파라메타를 identify하는 것이 유리할 것이다.

위의 알고리즘의 수렴성에 관하여는 Ljung[3] 의 연구 등이 널리 알려져 있으나, 전체 시스템의 안정성에 관한 한 아직 이론이 확립되어 있지 않다. 한편, 여기까지는 기준신호를 零으로 하는 regulation 문제이었으나, 零이 아닌 기준 신호까지 고려한 것으로 Gawthrop[4], Goodwin[5] 등의 연구가 있다.

STR을 이용한 실제문제에의 응용 예[6]는 이미 많이 발표되어 있다. 특히 paper machine, cement mill, glass furnace 등에 널리 채용되고 있으며, oil tanker의 항해제어에 도입하므로서 연간 수십만불의 경비를 절약할 수 있다는 보고[7]도 나와 있다.

2.2 MRAC

이것은 未知의 시스템에 적절한 adjustable controller를 결합시켜 전체 시스템의 전달함수 혹은 출력이 설계자가 바람직하다고 생각하는 이상적인 모델시스템의 그것들과 일치하도록 제어하는 방법이다. 물론 이상적인 모델시스템이나 신호의 선정도 실제 응용에 있어서는 중요한 문제로 대두되겠지만, 그것은 비단 MRAC뿐 아니라 최적 제어를 비롯한 제어 이론 전반에 걸쳐 적용되는 문제이므로 여기서는 거론하지 않기로 한다.

MRAC는 일찌기 1950년대부터 연구되기 시작했으나 그동안의 역사적인 흐름은 지면 관계상 생략하기로 하고, 현재의 MRAC의 형태를 갖추기 시작한 것은 1974년의 Monopoli[8]의 연구부터이며, 그후에 Morse[9], Narendra[10] 등에 의해 문제점이 보완되어 현재 거의 완벽한 이론이 확립되었다고 볼 수 있다. 한편 Egardt[11]는 STR의 관점에서 MRAC를 유도하였으며, 그의 연구가 MRAC에 관해 비교적 명쾌한 解釋을 하고 있으므로 그의 이론을 중심으로 MRAC를 설명하고자 한다.

연속시간 플랜트

$$\frac{y_p(t)}{u(t)} = K_p\ \frac{D_u(s)}{D_p(s)} \qquad (6)$$

에 대하여 모델시스템

$$\frac{y_m(t)}{r(t)} = K_m \frac{D_r(s)}{D_m(s)} \qquad (7)$$

를 생각한다. 지금부터 $D.(s)$는 모두 최고차수의 계수가 1인 monic 다항식이다. $D_p(s)$, $D_m(s)$, $D_u(s)$, $D_r(s)$의 차수는 각각 n, n, m, $r\ (\leq m)$으로 한다.

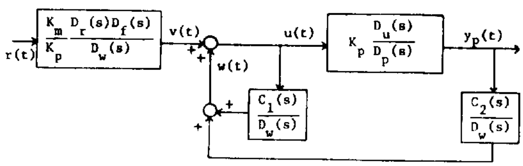

그림 1. 적응 시스템의 구조

그림 1에서 $D_w(s)$, $C_1(s)$, $C_2(s)$는 각각 n, $n-1$, $n-1$차 다항식이다. $D_w(s)$는 관측자 다항식이라고 부르는데 그것은 그림 1의 feedback 부분은 제어 이론에서의 observer-controller의 pair와 대응시킬 수 있기 때문이다.

$v(t)$에서 $y_p(t)$까지의 전달함수는

$$\frac{y_p(t)}{v(t)} = \frac{K_p D_w(s)\ D_u(s)}{D_p(s)[D_w(s) - C_1(s)] - K_p D_u(s)\ C_2(s)} \qquad (8)$$

이다. 여기에서 윗식의 분모는 observer-controller design의 경우에는 $D_w(s)\ D_m(s)$가 되어 유명

한 pole-assignment controller가 되지만, 이것을 일반화[12]하여

$$D_m(s)\, D_u(s)\, D_f(s) \qquad (9)$$

로 하면, 단 $D_f(s)$의 차수는 $n-m$, (8)식은

$$\frac{K_p D_w(s)}{D_m(s)\, D_f(s)} \qquad (10)$$

가 되고, 만일 그림 1의 feedforward 부분을

$$\frac{v(t)}{r(t)} = \frac{K_p}{K_m} \frac{D_r(s)\, D_f(s)}{D_w(s)} \qquad (11)$$

로 하게 되면 $r(t)$에서 $y_p(t)$까지의 전달함수가 모델 시스템의 그것과 일치하게 된다.

여기서 MRAC이론을 전개하는데 필요한 몇 가지 가정을 음미해 보기로 한다.

1) 플랜트의 차수의 上限 n은 旣知

일반적으로 플랜트의 차수의 정확한 값은 알기 어려우므로 우리는 그것의 上限만을 추측할 수 있는 것으로 한다. 만일 실제의 플랜트의 차수가 n 보다 작을 경우에는 (6)식의 플랜트의 분모, 분자가 공통항을 갖고 있는 것이 되므로, 그것의 상태 방정식은 noncontrollable and/or nonobservable이므로 observer-controller design이 불가능하다는 것은 널리 알려진 사실이다. 이것은 또한 (8)식과 (9)식을 $C_1(s)$, $C_2(s)$에 관한 방정식으로 생각했을때, $C_1(s)$와 $C_2(s)$가 解를 가질 수 없다는 것으로 부터도 알 수 있다. 그러나 MRAC의 경우에는 비록 분모, 분자에 공통항이 있을 때에도 $C_1(s)$, $C_2(s)$는 解(not unique)를 가지므로[13] 별로 문제가 되지 않는다. 따라서 플랜트의 차수의 上限에 대한 지식만으로 충분하다.

2) 상대차수 $n^* = n - m$은 旣知

(8), (9)식에서 만일 $D_f(s)$의 차수가 정확하게 알려져 있지 않으면 양변의 차수가 일치하지 않아서 등식이 성립되지 못하므로 반드시 n^*는 알고 있어야 한다.

3) 플랜트가 최소위상시스템

즉, $D_u(s)$가 안정인 다항식이어야 하는데 이것은 (9)식에서 $v(t)$, $y_p(t)$ 사이의 전달함수의 분모에 $D_u(s)$가 포함되어 있으므로 $D_u(s)$가 불안정한 다항식인 때에는 위의 제어방식은 실현될 수 없다.

만일 플랜트의 파라메타의 값을 알고 있을때에는 위와 같은 방법으로 controller를 구성할 수 있지만, 그렇지 못한 경우 controller의 파라메타 $C_1(s)$, $C_2(s)$를 추정하지 않으면 안된다. 다음에는 적응방식에 의해 어떻게 파라메타를 추정하고, 전체의 시스템을 실현하는가에 관해 알아보기로 한다.

우선 출력오차 $e(t) \triangleq y_p(t) - y_m(t)$를 다음과 같이 쓰기로 하자.

$$\begin{aligned}
D_m(s)\, e(t) &= D_m(s)\, y_p(t) - D_m(s)\, y_m(t) \\
&= D_m(s) \frac{D_f(s)}{D_f(s)} \frac{K_p D_u(s)}{D_p(s)} u(t) - K_m D_r(s)\, r(t) \\
&= \frac{K_p}{D_f(s)\, D_p(s)} \Big\{ D_p(s)\, [D_w(s) - C_1(s)] - K_p D_u(s)\, C_2(s) \Big\} u(t) - K_m D_r(s)\, r(t) \\
&\qquad\qquad \text{from (9)} \\
&= \frac{K_p}{D_f(s)} [D_w(s) - C_1(s)]\, u(t) - \frac{K_p C_2(s)}{D_f(s)} y_p(t) - K_m D_r(s)\, r(t) \\
&= D_w(s) \Big[K_p \frac{1}{D_f(s)} u(t) - \frac{K_p C_1(s)}{D_f(s)\, D_w(s)} u(t) - \frac{K_p C_2(s)}{D_f(s) D_w(s)} y_p(t) - \frac{K_m D_r(s)}{D_w(s)} r(t) \Big] \\
&= D_w(s) \Big[K_p \frac{1}{D_f(s)} u(t) - \theta^{\mathrm{T}} \Psi(t) - \frac{K_m D_r(s)}{D_w(s)} r(t) \Big] \\
&= D_w(s) \Big[-\bar{\theta}^{\mathrm{T}}\, \bar{\Psi}(t) - \frac{K_m D_r(s)}{D_w(s)} r(t) \Big] \qquad (12)
\end{aligned}$$

따라서,

$$e(t) = -\frac{D_w(s)}{D_m(s)} \Big[\bar{\theta}^{\mathrm{T}} \bar{\Psi}(t) + \frac{K_m D_r(s)}{D_w(s)} r(t) \Big] \qquad (13)$$

여기서 $\bar{\theta}$의 추정치 $\bar{\theta}(t)$에 의한 $e(t)$의 추정치를

$$\hat{e}(t) = -\frac{D_w(s)}{D_m(s)} \Big[\bar{\theta}(t)^{\mathrm{T}} \bar{\Psi}(t) + \frac{K_m D_r(s)}{D_w(s)} r(t) \Big] \qquad (14)$$

로 정의하면 이것이 Monopoli의 augmenting error가 되며, 다시

$$\eta(t) = e(t) - \hat{e}(t) \quad (15)$$

가 augmented error이다.

MRAC의 알고리즘에서 중요한 것은

i) controller 파라메타의 적응법칙(adaptation law)과 ii) 입력신호 $u(t)$의 발생이다. 먼저(15)식의 $\eta(t)$가 0이 되도록 적응법칙을 택하고, 다음에 (14)식의 $e(t)$가 0이 되도록 $u(t)$를 발생시키면 문제가 전부 해결될 것이다. 그러나 만일 n^*가 2보다 클 때에는 $e(t)$를 직접 0으로 하려면 결국 출력의 미분을 필요로 하게 되는데, 실제적인 문제로서 출력은 항상 잡음을 포함하고 있으므로 출력의 미분은 피해야 된다. 그러므로 $e(t)$를 완전히 0으로 할 수는 없고 거기서 기인하는 전체시스템의 안정성이 문제가 된다. 이것은 Morse, Narendra등에 의해 $\eta(t)$의 식에 적당한 2차 형식을 추가함으로서 교묘하게 해결되어 있다.

또한 파라메타 적응법칙으로서는

$$\dot{\theta}(t) = -F\,\bar{\Psi}(t)\,\eta(t) \quad (16)$$

와 같이 상수의 Gain 행렬 F를 쓰는 것이 보통이지만, 최근에는 F를 $\bar{\Psi}(t)$에 의존하는 시변행렬 $F(t)$로 하므로서 수렴 속도를 개선하는 방식[13],[14]도 제안되어 있다.

MRAC를 이용한 응용 예도 power system, electrical motor control 등 많은 보고[15],[16]가 있으나 아직 STR만큼 활발하지는 않은 것 같다.

2.3 적응제어의 직접법과 간접법에 관하여

Narendra[17]는 MRAC의 직접법과 간접법의 등가성을 주장하고 있으나 필자의 견해로는 그의 직접법과 간접법은 巨視的인 관점에서 보면 결국 직접법이며 엄밀한 의미에서의 간접법은 MRAC와는 따로 다루어져야 한다.

이 간접법의 대표적인 것으로는 Kreisselmeier의 방법[18]을 들 수 있다. 즉 먼저 플랜트의 파라메타 및 상태 벡타를 적응관측자[19]에 의해 추정한 뒤에, optimal control 혹은 pole-assignment control 등의 controller를 구성하는 것이다. 그의 방법과 MRAC와의 관련성 혹은 등가성 云云하는 것은 거의 의미가 없다고 생각한다.

3. 장래의 연구과제

지금까지 STR과 MRAC에 관하여 간단히 소개했으나 앞에서도 언급한 바와 같이 실제문제에의 응용에 있어서 STR보다 MRAC가 별로 활발하지 못한 느낌이 든다. 그것은 MRAC의 이론 자체가 아직 상당히 제한된 범위 내에서 전개되어 왔기 때문이며 따라서 보다 많은 응용을 가능하게 하기 위해서는 다음의 몇 가지 점에 있어서 이론이 확장되어야 할 것이다.

1) 非最小위상 시스템 : 현존이론의 거의 대부분이 최소위상 시스템에만 적용 가능한 것이므로 그렇지 않은 시스템에도 쓰일 수 있는 이론이 필요하다. 물론 비최소위상 시스템을 대상으로 하는 이론이 없지는 않지만[20] 아직은 초보적인 단계라고 생각한다. 특히 離散시간 시스템의 경우에는 연속시간 시스템에서 최소위상 시스템이었던 것이 sampling 간격에 따라서는 비최소위상 시스템이 되는 경우도 있다는 것이 지적[21]되어 있으므로 더욱 절실히 요구된다.

2) Stochastic Noise : 원래의 MRAC가 이러한 잡음의 영향에 관하여는 논의되어 있지 않으므로 보다 체계적인 解釋이 필요하다.

3) 파라메타의 변화 : 현재의 이론은 파라 메타가 불변일 경우에만 확립되어 있다. 파라메타의 여러종류의 변화에 대한 고찰이 있어야 할 것이다. 최근의 Caines의 연구[22]가 하나의 참고가 되리라고 믿는다.

4) 多入出力 시스템 : 많은 플랜트의 경우, 입·출력의 수가 1 이상인 多入出力 시스템이므로 현재의 單入出力 시스템에 관한 이론을 多入出力 시스템에 확장할 필요가 있다. 약간의 발표된 연구[23] 가 있기는 하나 아직도 해결되어져야 할 문제가 많다. 이 때에 상대차수에 해당하는 interactor matrix[24]가 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

우리나라에서도 요즈음 적응제어에 내해 많은 관심이 보여지고 있고 논문도 발표되고 있지만 산업계에서는 아직 별 흥미를 갖고 있지 않은 것 같다. 물론 고전적인 제어, 예를 들면 PID제어로 충분히 처리될 수 있는 시스템도 많이 있지만 보다 고급(?)의 controller가 요청되는 시스템도 적지 않을 것으로 생각되므로 산업계의 연구자도 많은 관심을 보이기 바란다.

끝으로 천학비재한 필자에게 투고의 기회를 준 편집위원회에 진심으로 감사하며 이 拙稿가 적응 제어를 처음 배우려는 분들에게 참고가 되고, 또한 산업계의 여러분이 적응제어에 관해 관심을 갖게되는 계기가 된다면 무한한 영광으로 생각한다.

참 고 문 헌

[1] Åstrom, K.J. and B. Wittenmark (1973). On Self-Tuning Regulators, Automatica, vol. 9, 185-199.

[2] Åström, K.J. (1970). Introduction to Sto chastic Control Theory, Academic Press.

[3] Ljung, L. (1977). On Positive Real Transfer Functions and the Convergence of Some Recursive Schemes, IEEE Trans., vol. AC-22, 539-551.

[4] Gawthrop, P.J. (1977). Some Interpretations of the Self-Tuning Regulators, Proc. IEE, vol. 124, 889-894.

[5] Goodwin, G.C. et al. (1980). Discrete-Time Multivariable Adaptive Control, IEEE Trans., vol. AC-25, 449-456.

[6] Åström, K.J. (1981). Theory and Applications of Adaptive Control, IFAC Congress, Kyoto.

[7] Källström, C.G. et al. (1979). Adaptive Autopilots for tankers, Automatica, vol. 15, 241-254.

[8] Monopoli, R.V. (1974). Model Reference Adaptive Control with an Augmented Error Signal, IEEE Trans., vol. AC-19, 474-485.

[9] Morse, A.S. (1980). Global Stability of Parameter–Adaptive Control System, IEEE Trans., vol. AC-25, 433-439.

[10] Narendra, K.S. et al. (1980). Stable Adaptive Controller Design, Part II; Proof of Stability, IEEE Trans., vol.. AC-25, 440-448.

[11] Egardt, B. (1978). Stability of Model Reference Adaptive and Self-Tuning Regulators, Technical Report, Lund Institute of Technology

[12] Kailath, T. (1980). Linear Systems, Prentice-Hall.

[13] Yang, H.W. (1982). Model Reference Adaptive Control Schemes with a Time-Varying Gain Matrix, Ph. D. Thesis, Kyoto University.

[14] Landau, I.D. (1980). An Extension of a Stability Theorem Applicable to Adaptive Control, IEEE Trans., vol. AC-25, 814-817.

[15] Narendra, K.S. and R.V. Monopoli (1980). Applications of Adaptive Control, Academic Press.

[16] Unbehauen, M. (ed.) (1980). Methods and Applications in Adaptive Control, Springer-Verlag.

[17] Narendra, K.S. and V.S. Valavani (1979). Direct and Indirect Model Reference Adaptive Control, Automatica, vol. 15, 653-664.

[18] Kreisselmeier, G. (1980). Adaptive Control Via Adaptive Observation and Asymptotic Feedback Matrix Synthesis, IEEE Trans., vol. AC-25, 717-722.

[19] Kreisselmeier, G. (1977). Adaptive Observers with Exponential Rate of Convergence, IEEE Trans., vol.. AC-22, 1-8.

[20] Åström, K.J. and B. Wittenmark (1980). Self-Tuning Controllers based on pole-zero placement, Proc., TEE, vol. 127, 120-130.

[21] Wellstead, P.E. et al. (1979). Pole-Assignment Self-Tuning Regulator, Proc. IEE, vol. 126, 781-787.

[22] Caines, P.E. (1981). Stochastic Adaptive Control: Randomly Varying Parameters and Continually Disturbed Controls, IFAC Congress, Kyoto.

[23] The 20th IEEE Conference on Decision and Control, Session FA 1, 1981.

[24] Wolovich, W.A. and P.L. Falb (1976). Invariants and Canonical Forms under Dynamic Compensation, SIAM J. Control and Optm., vol., 14, 996-1008.