

『最新のファジィシステム技法』特集号

解説

アドバンストファジィ制御
-ファジィモデルに基づく制御-

田中 一男*

1. はじめに

ファジィ制御はファジィアルゴリズムの応用 [1] として始まり, 80 年代に入って日本で実用化 [2,3] された。その後, 平成バブルの絶頂期とシンクロし, 華々しいファジィ制御応用ブーム (ファジィバブル: なんでもどこでもファジィ) を経験した。当時のファジィバブルは工学の分野をはるかに越えた社会現象であった。たとえば, ある証券会社では「ファンド・ファジィ」と銘打ったファンドを売り出したり, 東京の百貨店が「丸の内に来た春はファジィ」というキャッチフレーズでキャンペーンを行った。ある月刊少年漫画雑誌には「魔法使いサリー」ならぬ「魔法使いファジィ」が登場したり, ファジィ脱毛なるものを売りにしたエステも登場し, さらに「ファジィ」という名のスナックまで出現した。まさにファジィバブルの絶頂期であったが, 平成バブルの崩壊の後を追うようにファジィバブルも泡と消えていった。しかし, 平成バブル崩壊後, 瀕死状態の日本経済 [4] とは対照的に, ファジィ制御はファジィバブル崩壊から早々と立ち直った。当時の派手さは影を潜めたものの, ファジィ制御は「高度知的制御」と「ファジィモデルに基づく制御」に 2 極分化しながら着実に発展している。これらの新しい流れをアドバンストファジィ制御 [5] と呼ぶ。本解説では, 近年発展を遂げたファジィモデルに基づく制御に焦点を絞り, これまでの研究成果を紹介する。なお, 最近出版されたリサーチモノグラフ [6] はこれまでの研究成果をサーベイするのに役立つ。

2. ファジィモデルに基づく制御

一般の設計者やプラントエンジニアにとって非線形制御 [7-9] を理解し, 使いこなすことは容易ではない。ファジィモデルに基づく制御は比較的簡単にかつ直感的に非線形制御を実現できることが特徴である。

2.1 制御対象のファジィモデル構築

ファジィモデルに基づく制御では, 非線形システムのダイナミクスを高木・菅野ファジィモデル [10] で表現し, このモデルから制御器を設計する点が大きな特徴である。熟練者の操作知識やノウハウを規則化する従来の

Mamdani のアプローチとはまったく異なっている。高木・菅野ファジィモデルの特徴は後件部に linear なモデル記述を持つ点である。r 個の規則からなる高木・菅野ファジィモデルは次のように表現される。

$$\text{Model Rule } i: \text{If } z_1(t) \text{ is } M_1^i \text{ and } \dots \text{ and } z_p(t) \text{ is } M_p^i \\ \text{then } s\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (1)$$

(1) 式は r 個の Model Rule の中で i 番目の Model Rule を示したものである。ここで, $s\mathbf{x}(t)$ は連続系の場合 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ を, 離散系の場合 $\mathbf{x}(t+1)$ を表す。 M_p^i はファジィ集合である。 $z_1(t) \sim z_p(t)$ は前件部変数であり, 状態変数に依存していてもよく, 他の外部変数などに依存していてもよい。(1) 式は次のように計算 (推論) される。

$$s\mathbf{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{ \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t) \} \quad (2)$$

ここで, $z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_p(t)]^T$, $w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_j^i(z_j(t))$ である。 $M_j^i(z_j(t))$ はファジィ集合 M_j^i の $z_j(t)$ におけるメンバーシップ関数値を示しており, $w_i(z(t))$ は Model Rule i の適合度を示している。ファジィ集合 M_j^i による前件部空間のファジィ分割に空集合がなければ, この適合度は $w_i(z(t)) \geq 0$ および $\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0$ を満たす。また, $w_i(z(t))$ を正規化した $h_i(z(t))$ は $h_i(z(t)) \geq 0$, $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$ となる。(1) 式の後件部は状態方程式表現となっているが, 状態方程式ではなく一般化プラント表現を用いるファジィモデルも提案され, このモデルに対する H_∞ 制御 [11], [12] も行われている。

(2) 式の高木・菅野ファジィモデルは universal であることが示されている [13]。実際に, 制御対象の非線形ダイナミクスが与えられれば厳密にあるいは高い近似精度でファジィモデルに置き換えることができる。ファジィモデルへの置き換えには sector nonlinearity という概念を用いる。Sector nonlinearity のアイデアは初めて [14] で示された。しかし, ここでは次元の簡単な場合のみが扱われ, 多次元の場合に起こる問題点については認識さ

* 電気通信大学 知能機械工学科

Key Words: advanced fuzzy control, fuzzy model-based control, fuzzy Lyapunov function, switching fuzzy model