

新しい制御手法と圧延への適用

片山 恭紀*・中島 正明*²・諸岡 泰男*³

New Control Technology and Its Application for Rolling Mill

Yasunori KATAYAMA, Masaaki NAKAJIMA and Yasuo MOROOKA

Key words : neuro computer ; fuzzy control ; decoupling ; shape control ; optimal control.

1. はじめに

圧延機は多くの部品、センサ、アクチュエータから構成され、非線形性が強く、しかも、同定すべきパラメータの数が多いため、完全な制御モデルを作ることができない。これまで、数多くの制御エンジニアが数十年に渡って研究開発¹⁾²⁾を行なってきたが決定的な解決には至っていない。

このため、伝達関数を基本とした古典制御、状態方程式に基づいた現代制御、設計者や操作者の知識を記述する論理式を基にした知識処理、入出力の因果関係式を基にしたニューラルネットワーク³⁾等の技術がそれぞれの特徴を生かした分野に利用されてきた。

すなわち、制御は物理現象に支配されており、機械が発揮できる最大限の能力を引き出すための道具として使われてきたのである。また、種々の物理現象に対し万能な方法はなく、発生する現象を見据えて、その現象に最適な制御方法を選択するのが現状の制御技術である。

本稿ではこれらの制御手法のうち、ファジィ制御、ニューロ制御について形状制御を例に概説する。

2. システム制御理論と情報処理の流れ

図1にシステム制御・情報処理技術の変遷を述べる。従来は物理的な現象を表す制御対象の微分方程式を、Laplace変換を用いて伝達関数で表現し、周波数応答法で制御系の安定判別や特性解析が行なわれていた。いわゆる、古典制御理論を基に制御系が設計されてきた。古典制御は入力と出力の関係に着目した制御で、制御性能の向上には限界があった。このため、古典制御に代わり、制御性能向上の要求を満足させるため、制御対象の内部状態を利用する現代制御理論の適用が圧延機制御の分野で活発化してきた。

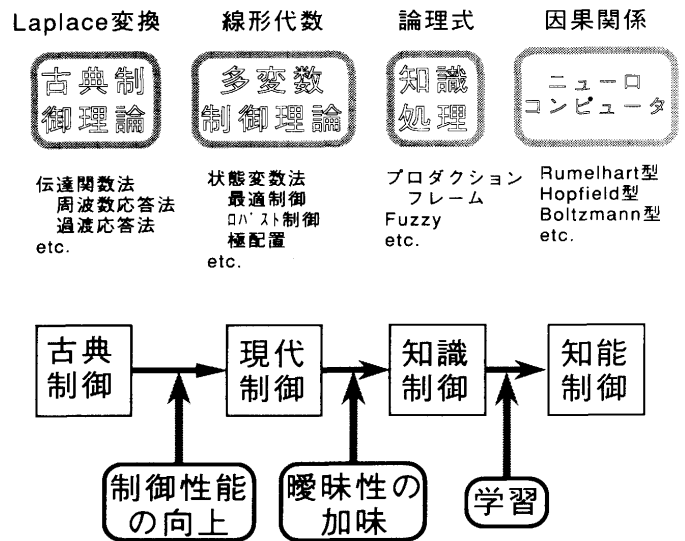


図1 情報・制御技術の変遷

現代制御理論はモデルが正確であれば、設計者が希望する性能を発揮でき、制御結果も定量的に評価できる。さらに、最近では古典制御で考慮されてきた周波数領域での設計の考え方なども取り入れられるようになり、設計の自由度も大きく増した。

一方、圧延システムは非常に複雑で、制御対象である圧延機の動作は非線形性が強く、制御モデルを決定するにも、実験で求めなければならないパラメータが多くなり、完全な制御モデルは作成できない。このためモデル化ができない部分や、できたモデルが複雑過ぎて、実時間の制御に利用できない場合もある。このため、電動機制御などのモデル化が容易な一部の分野に現代制御が使われてきた。

所期の圧延性能がパラメータ変動などで得られない場合、圧延機の操作者は手動介入することで、所望の精度を得ていた。すなわち、操作者の操作方法による運転が重要な役

平成4年9月22日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Sep. 22, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼解説)

* (株)日立情報制御システム (Hitachi Information & Control Systems Inc., 832-2 Horiguchi Katsuta 312)

* 2 (株)日立製作所おおみか工場 (Omika Works, Hitachi, Ltd.)

* 3 (株)日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

割を演じているのである。なお、操作者は定量的でなく、定性的な操作を行なっている。そこで、操作者の定性的な処理を取り入れたファジィ制御が圧延機に適用されている。その一例として、良好な形状を得るため、圧延機のクーラント制御にファジィ制御が適用され、実績を上げてきた。

ところで、クーラント制御の場合アクチュエータの数が多く、しかもその影響は局所的であるため、アクチュエータの近傍を制御すればよかった。それに対して、センザミアミルはアクチュエータの数が少なく、その影響が形状全体に及ぶため、操作者の操作はクーラント制御の場合と異なっている。

そのため、全体的な振る舞いを考慮できるとともに次第に賢くなっていくシステムが求められ、ニューロコンピュータがその機能の一部を実現できると期待され、圧延機では形状制御等で実用化がなされてきた。

以下、圧延機形状制御を例にファジィ制御、ニューロ制御等の新しい制御手法の具体例と、それらの制御の特徴を述べる。

3. ファジィ制御の応用

ファジィ制御は、人間の定性的な操作を、定量的な操作に変換する手法であり、圧延機制御は、セットアップ制御¹²⁾、板厚・張力干涉防止¹³⁾、形状制御¹⁴⁾等に利用されてきた。ここでは、ファジィ制御を形状制御へ適用した例について解説する。

古典制御理論や現代制御理論では、制御対象の非線形性や、モデル作成のために同定しなければならないパラメータの数が多過ぎて、良好な制御モデルが作れないこともある。この場合、熟練操作者の経験を利用すると、高品質な圧延材を得られることが有る。このとき、操作者の動作は定量的には表現できず、定性的になってしまう。

しかしながら、機械は定量的な指令に従って動作するために、定性的な情報は利用できなかった。これを解決する手段として生まれたのがファジィ制御である。

ファジィ制御は、メンバーシップ関数により定量的な量を定性的な量に変換する部分、定性的なルールから結論を求める部分、および、複数の結論を統合して一つの結論を求め、定性的な量を定量的な量に戻す部分から構成される。

ここでは、設計者や操作者の制御対象に対する定性的な知識を巧みに利用できるファジィ制御をアルミニウム圧延機のクーラントによる形状制御に利用した例を述べる。

アルミニウム圧延機の構造を図2に示す。ここで、圧延荷重、ベンダ、ロールシフト等による形状変化に対し、定量的な制御モデルを使うことができる。このため、ベンダ、ロールシフトに対する形状制御は、従来から実施されている山登り法を用いた最適制御を適用する。

ところで、スポットクーラントをオンオフすることによ

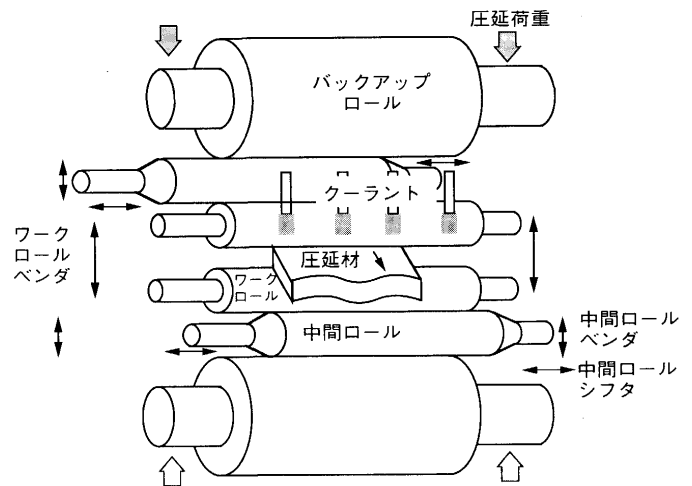


図2 圧延機の構造

り形状を制御するクーラント制御は、

(1)アクチュエータの数が多

(2)制御対象の動作を記述する熱伝導方程式が偏微分方程式となり、簡単に制御モデルを作成できない等の理由により、通常のPID制御では良好な形状を得ることは難しかった。

一方、ファジィ制御は、

①規模が大きくて制御周期内に制御演算が終わらない

②制御モデルが複雑すぎる

③操作者の定性的な操作が利用できる

等の分野に適していると言われている。

これらの理由により、システム設計者、操作者の定性的な操作を制御に取り入れるファジィ制御をクーラント制御に採用することにした。

操作者はクーラント制御を行なうときに形状偏差の大きさ (A_i) だけでなく、形状偏差の時間変化率 (B_i)、形状偏差の近傍との空間的關係 (C_i) をみて、総合的に判断している。これらの知識を整理し、ルールを求めた。

但し、 $A_i = \Delta \varepsilon_i(k)$,

$B_i = (\Delta \varepsilon_i(k) - \Delta \varepsilon_i(k+1)) / T_s$,

$C_i = \Delta \varepsilon_{i-1}(k) + \Delta \varepsilon_{i+1}(k) - 2\Delta \varepsilon_i(k)$,

i ;クーラントノズル位置番号

k ;サンプリングタイム

T_s ;サンプリング周期

である。

次に、これらのルールを使ったシステム構成を図3、従来制御の制御結果を図4、ファジィ制御による制御結果を図5に、従来制御と、ファジィ制御の比較を図6に示す。

図4と図5を比較すると、従来制御と比べてファジィ制御が良好で、かつ、クーラントの動作も少なく、効率的な動きを行なっている。

さらに、図6から C_i の分散である σ_c が従来制御と比較して大幅にファジィ制御の方が向上している。これは、定性的には向上できると分かっている事項であっても、定量的

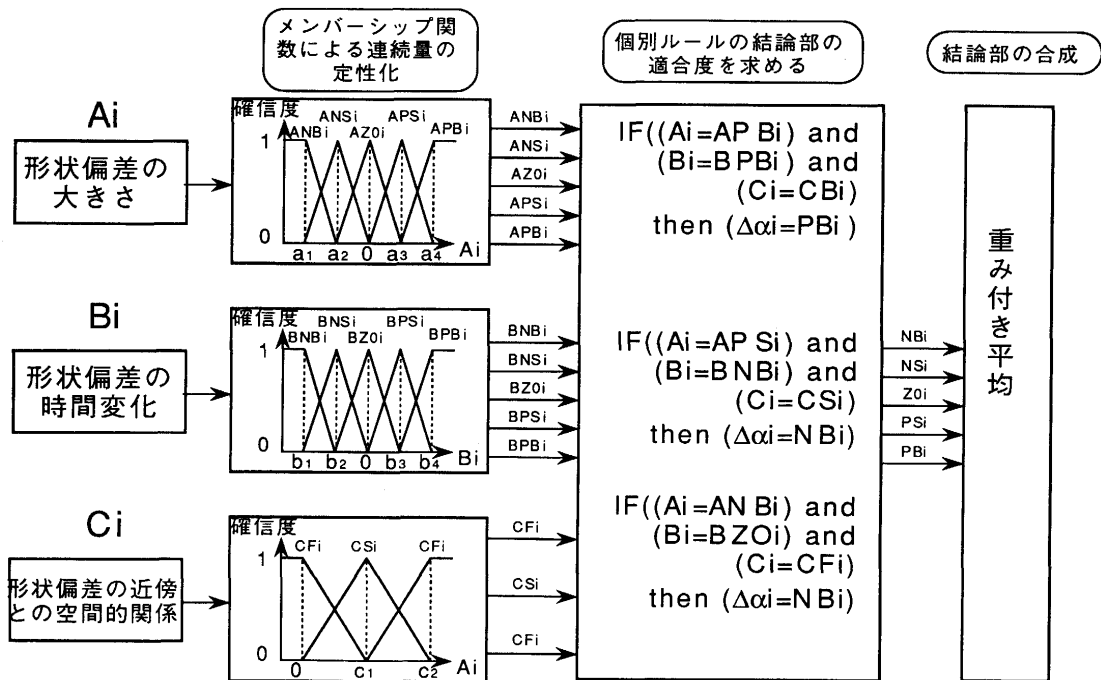


図3 圧延機ファジィ制御のルール概要

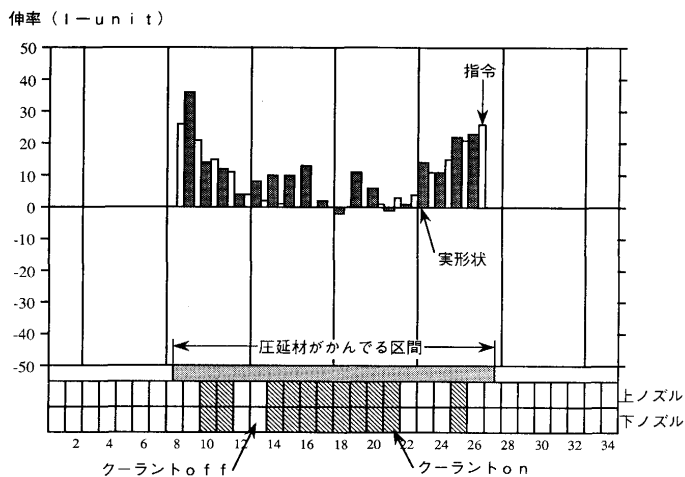


図4 クーラント形状制御結果（従来制御）

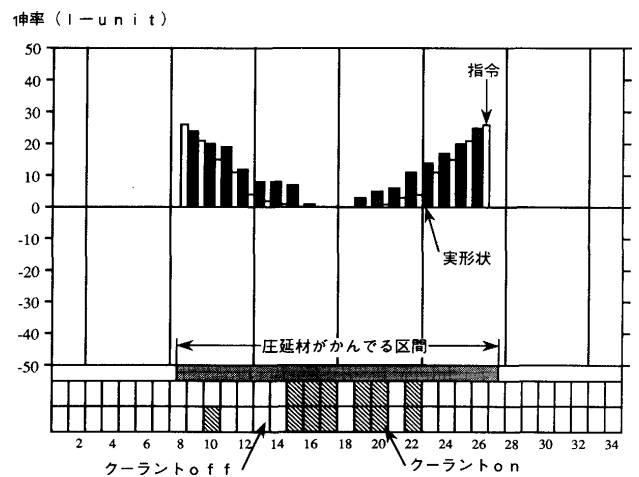


図5 クーラント形状制御結果（ファジィ制御）

に数式化できないため制御に適用できなかった評価 C_i が、ファジィ制御を用いることで適用できるようになったためである。

ところで、従来からも性能を確保するために考慮されている時間的变化分に対する評価 B_i の分散 σ_B は、従来制御も、ファジィ制御も同じであることが分かる。すなわち、従来制御でも実現できる評価は当然必要であるが、ファジィだからできる評価を加えるとファジィ制御の特徴が大きく発揮できる。

すなわち、従来のフィードバック制御理論では評価 A_i や評価 B_i のように同一カテゴリーのものしか扱えず、定性的に性能向上ができると分かっている評価 C_i のように異なるカテゴリーを扱うためには複雑なロジックが必要であり、調整も難しかった。が、カテゴリーが異なっても、結論部の

合成によって統一的に扱える手法を与えているため、ファジィ制御では評価 C_i が簡単に扱え、性能が向上できるのである。

4. ニューロの応用

鉄鋼プロセスの分野でも、ニューロコンピュータの学習能力、補完能力、分類能力等の特質を生かし、高炉制御、圧延形状制御等に利用されてきた。本章では圧延機形状制御へのニューロコンピュータの適用例を示す。

図7に階層型のニューロコンピュータを示す。ニューロコンピュータはニューロンモデルから構成される。ニューロンモデルは人間の神経細胞を模擬したものである。ニューロンモデルの手本である神経細胞では、前段の他の神経

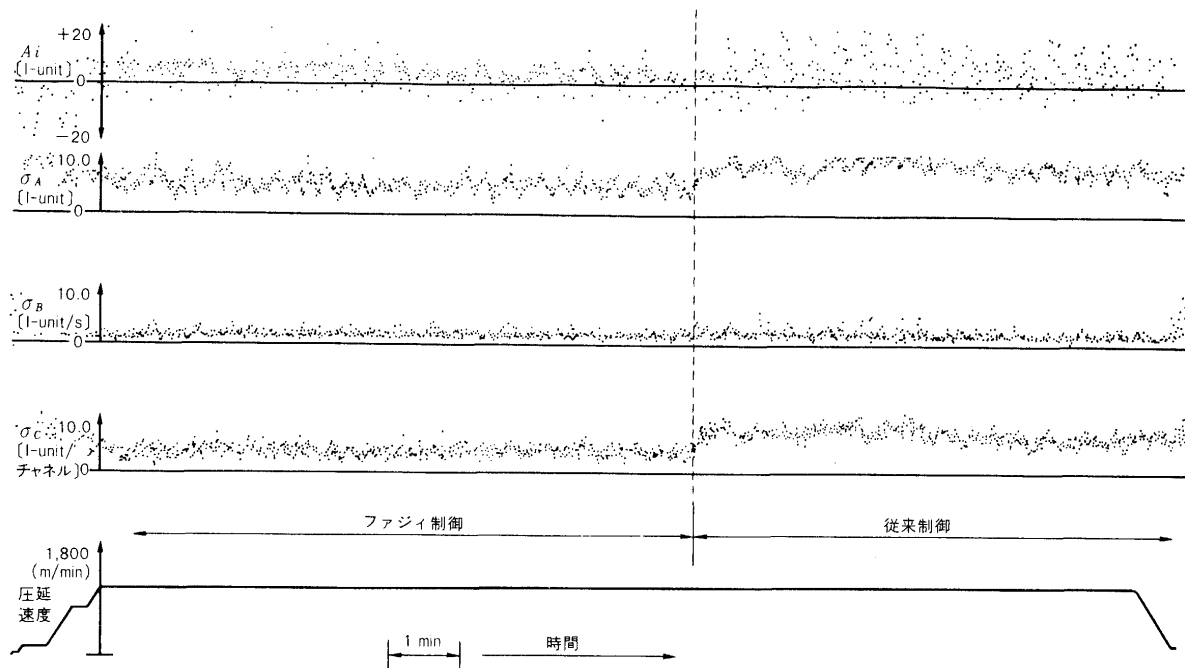


図6 ファジィ制御と従来制御の比較

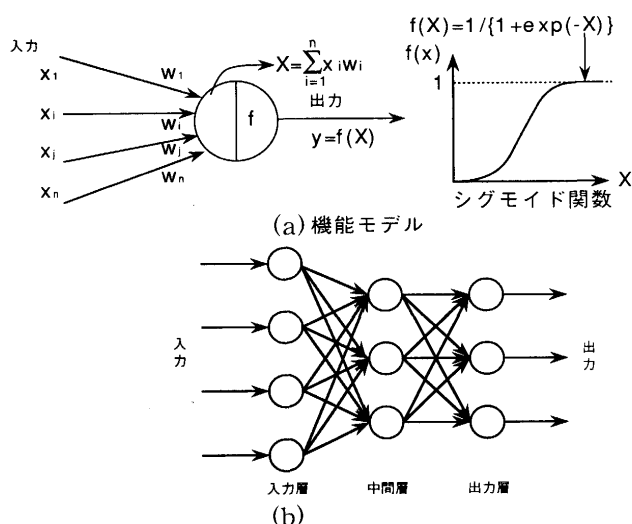


図7 階層型ニューロコンピュータの概要

細胞 x_1, x_2, x_n から送り込まれた化学物質の総和が、一定レベル越えると、興奮して、後段の他の神経細胞に化学物質を送り出す機能を具備している。なお、他の神経細胞からの化学物質の通りやすさは学習によって変化する。

この神経細胞の働きをモデル化したのが図7 (a)である。入力信号 x_1, x_2, x_n は通りやすさを模擬した荷重係数 w_1, w_2, w_n との積和を取り、飽和関数を通して出力が得られる。

これらニューロンを○で表し、図7 (b)に示すような階層型(Rumelhart型)のネットワークを構成すると、パターン認識や成分抽出、関数補間等の機能を有し、リアルタイム制御に適したものとなる。以下、センジミアミルの形状制御を例にニューロコンピュータの応用例を述べる。

図8にセンジミアミルの形状制御の開発の狙いを示す。センジミアミルは機構が複雑で、その動作の定量化が難し

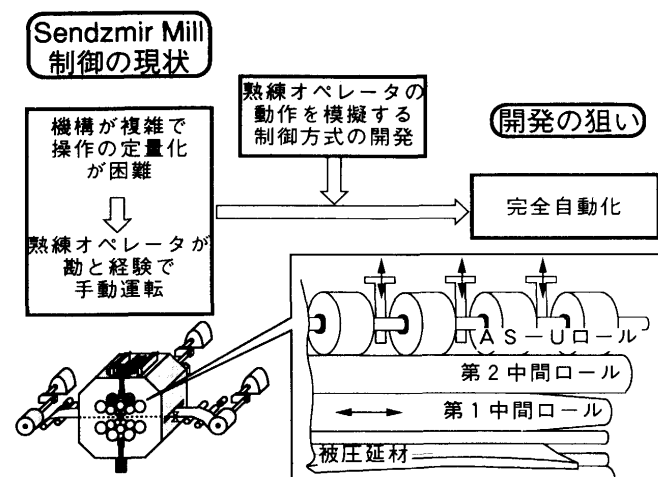


図8 ZR-Mill形状制御の開発の狙い

く、熟練操作者の勘と経験で運転しているのが現状であった。

ところが、操作者の個人的能力や体調によって、生産される圧延材の品質が大きく左右される。そこで完全な自動化が要求されてきた。このため、熟練操作者の動作を模擬する制御方式を開発することにした。

操作者の動作をモデル化すると、図9となる。すなわち、操作者は制御対象の動作を感覚器である目を介して形状パターンを認識する。目は多量のデータを処理して特徴量を抽出し、情報を圧縮するとともに、経験で得られた基準パターンに分類している。基準パターンとは操作者がアクチュエータを操作すれば修正できる偏差のパターンである。この動作は一種の情報の抽象化であると考えられる。

基準パターンが認識できると、経験や学習で獲得した基

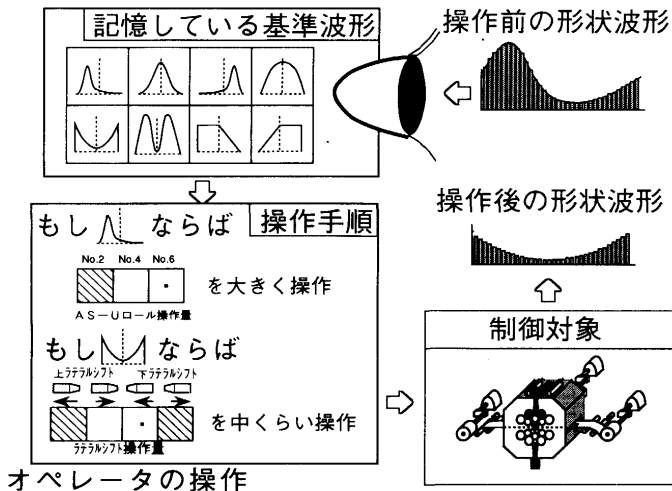


図9 操作のモデル

準パターンと、操作するアクチュエータの関係である操作手順に従って、アクチュエータを操作する。

ここで、操作者の基準波形を抽出できる能力は高々、1種類か、多くて2種類である。しかもその成分量までは認識できないのである。そこで、最も多く含まれる成分にたいし、少しずつアクチュエータの操作を行ない、その成分を低減する。

図9の場合、操作前の形状は両端部と、左から1/4のところが伸びている。操作者は1/4の伸びを認識し、操作手順に従ってNo.2のAS-Uロールを操作する。

この操作の結果、1/4伸びが解消され、両端部の伸びが顕在化する。次に、操作者は両端部の伸びに対する修正操作をするのである。

この操作手順は、定性的で、それを工学的に実現するにはファジィ制御が最適である。ところが、ファジィ制御の入力は図7の説明でも明らかなように、スカラー量であり、パターンのように分布した量は扱えない。

ところで、ニューラルネットワークは分布したパターンを分類できる能力があるため、パターンを分類する部分にニューラルネットワークを使うことにした。

今回開発した、操作者と同様な動作を実行する制御システムの構成を図10に示す。制御対象の形状信号はニューラルネットに入力される。操作者の場合と異なり、ニューラルネットワークは形状信号に含まれる複数の基準波形成分を抽出できる。

ニューラルネットワークの出力は、基準波形の確信度としてファジィ制御に渡される。メンバーシップ関数で確信度を求める前件部がニューラルネットワークに分担されるので、ファジィ制御では、結論部の処理である各ルールの結論を求め、複数の結論を合成する。

次に、ニューラルネットとファジィ制御を組み合わせたフィードバック系を構成し、その制御動作をシミュレーションにより確認する。なお、操作者の操作方法を整理し纏

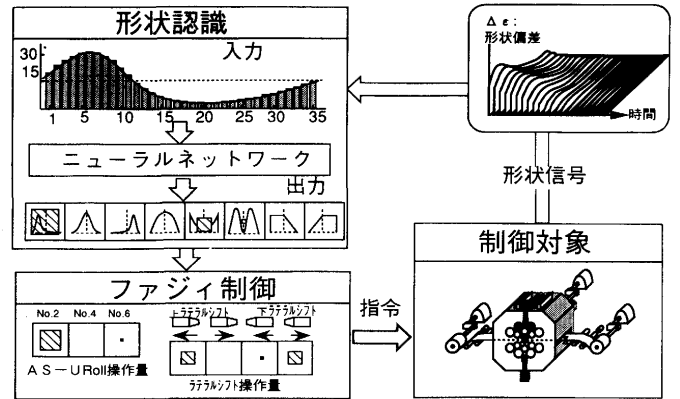


図10 システム構成

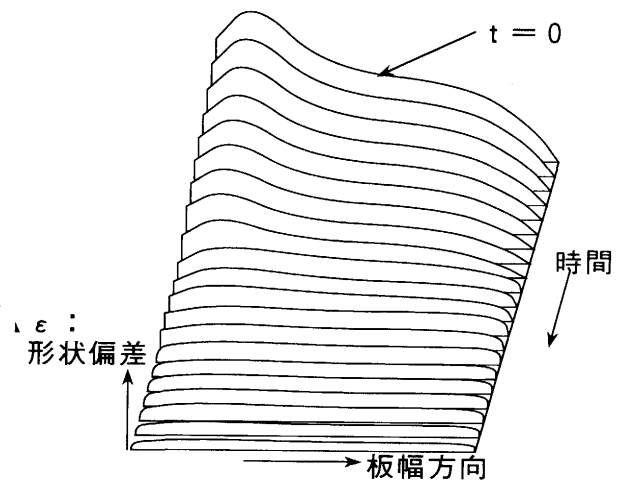


図11 形状制御のシミュレーション結果

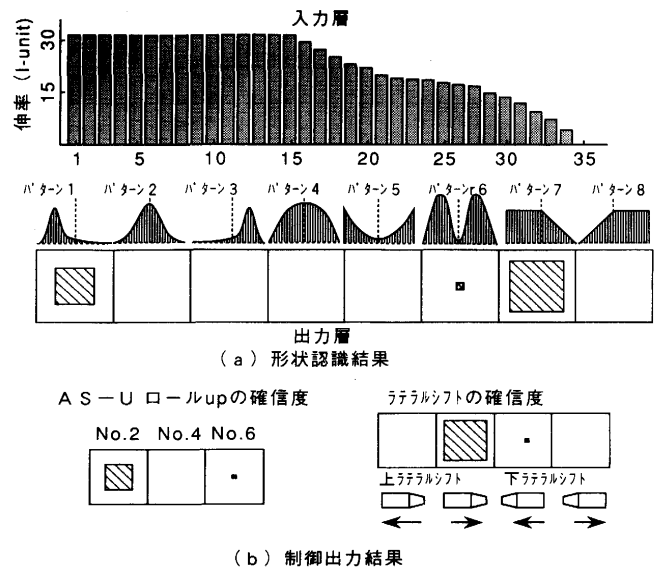


図12 ニューロコンピュータの認識結果と制御の関係

めると、基準波形は8つのパターンに分類されることが分かった。

図11は開発方式の制御結果を時間経過で示したものである。図12に、 $t = 0$ におけるニューラルネットの入力である

形状偏差，ニューラルネットの出力状態，及びファジィ制御からの指令を示す。ここで，指令はAS-Uロールを動作させる確信度，ラテラルシフトのシフト量を示す。なお，入力層の伸率30 ($I-U_{nit}$: 圧延材の伸率を表す指標) 以上のところは入力層の飽和により，カットされている。

ニューラルネットの認識結果よりパターン1が20%，パターン7が80%であることが分かる。ファジィ制御はこのパターン認識の結果を用いAS-UロールNo. 2を上昇させる方向の確信度が20%，上ラテラルロールを右にシフトする確信度が80%という結論を導く。

このような操作を1秒毎に続けて制御した形状波形を示したものが前述の図11である。このシミュレーション結果から，ニューラルネットとファジィ制御を組み合わせて良好な圧延機形状制御が可能であることが分かった。

5. 今後の知的制御技術の展望

以上，人間等の知的活動を取り入れたニューロ/ファジィ制御を圧延機形状制御に適用した例を述べた。

一方，現代制御理論もブロック化非干渉制御⁸⁾⁹⁾，予見制御¹⁶⁾，及び， H^∞ 制御^{17)~21)}に代表されるロバスト制御等が実際に圧延機制御に適用されてそれなりの成果がでている。

これらの個別制御の性能向上に加えて，前述のようにファジィの不得意な部分をニューロコンピュータで補い，新たな機能を発揮するような使い方がでてきた。

すなわち，現代制御，ファジィ制御，ニューロコンピュータ等それぞれが得意の分野を受け持ち，お互い補完し合う制御が今後も盛んに開発されるであろう。

6. まとめ

以上，ファジィ制御，ニューロ制御を例に最近の知的制御技術について述べた。

すなわち，制御は万能ではなく，その働きは，機械の本来もつ性能を最大限発揮させるために，それぞれの制御対象がもつ特徴を最大限生かす使い方にある。

ファジィ制御は，定性的に性能改善ができることが分かりながら，カテゴリーが異なるため利用できない規則も取り込むことができ，これからも，種々の使い方が期待できる。

ニューロ制御は形状のようなパターンを，パターンの成分量のような，ファジィ制御に適用できるスカラー量に変換できるようになり，制御にも新しい側面が生まれた。

文 献

- 1) 的場祥行，高橋亮一：計測と制御，**29** (1990) 6, p. 518
- 2) 電気学会技術報告 (II部) 第315号，制御理論の産業応用の現状と課題，(1989)
- 3) 中野 馨，飯沼一元，ニューロンネットグループ：入門と実習・ニューロコンピュータ，(1989)，p.12 [技術評論社]
- 4) 福島賢也，辻 勇一，関義朗，森田進一：東芝レビュー，**42** (1987) 11, p.827
- 5) 藤崎泰正，浅田秀樹，北村 章：計測制御学会論文集，**27** (1991) 6, p.723
- 6) 川口忠雄，芳谷尚治，大貝春俊，原川哲美：Computrol，**27** (1989)，p.66
- 7) 大西忠治，寺崎忠男，谷口弘志，吉見洋，井ノ口齊亮，石原 明，平山暎一，谷口政隆，服部正志：材料とプロセス，**4** (1991)，p.1388
- 8) 片山恭紀，諸岡泰男：電学論D，**108** (1988) 6, p.540
- 9) 片山恭紀，諸岡泰男，服部 哲，斉藤 裕，松井陽一：電気学会情報処理研究会資料，IP-87-11，(1987)，p.101
- 10) P.L.Falb and W.A.Wolovich：IEEE Trans. Automatic Control，AC-9，(1964)，p.405
- 11) W.M.Wonham：Multivariable Control，(1979)，p.215 [Spring-Verlag, New York Inc.]
- 12) 鎌田憲幸：塑性と加工，**32** (1991)，p.130
- 13) 長谷川明彦，瀧 文男：製鉄研究，(1990) 339, p.53
- 14) 前田俊夫，堺 英樹，服部 哲，中島正明，片山恭紀：日立評論，**71** (1989)，p.803
- 15) 片山恭紀，諸岡泰男，服部 哲，中島正明：電気学会産業計測制御，産業システム情報化合同研究会資料，IIC-90-12，IIS-90-1，(1990)，p.1
- 16) 土谷武士，江上 正：現代制御工学，(1991)，[産業図書]
- 17) 高橋 毅，山下洋治，美多 勉，三平満司：第35回自動制御連合講演会資料，(1992)，p.245
- 18) 塩谷政典，植山高次，芳谷直治：第35回自動制御連合講演会資料，(1992)，p.249
- 19) 北田 宏，浜田勝成，近藤 修，関野一人，花崎一治，山本俊行：第35回自動制御連合講演会資料，(1992)，p.251
- 20) 井関康人，池田英俊，小寺嘉一：第35回自動制御連合講演会資料，(1992)，p.253
- 21) 武田健三，黒谷憲一，高野正心，大内茂人，谷坂彰彦：第35回自動制御連合講演会資料，(1992)，p.285