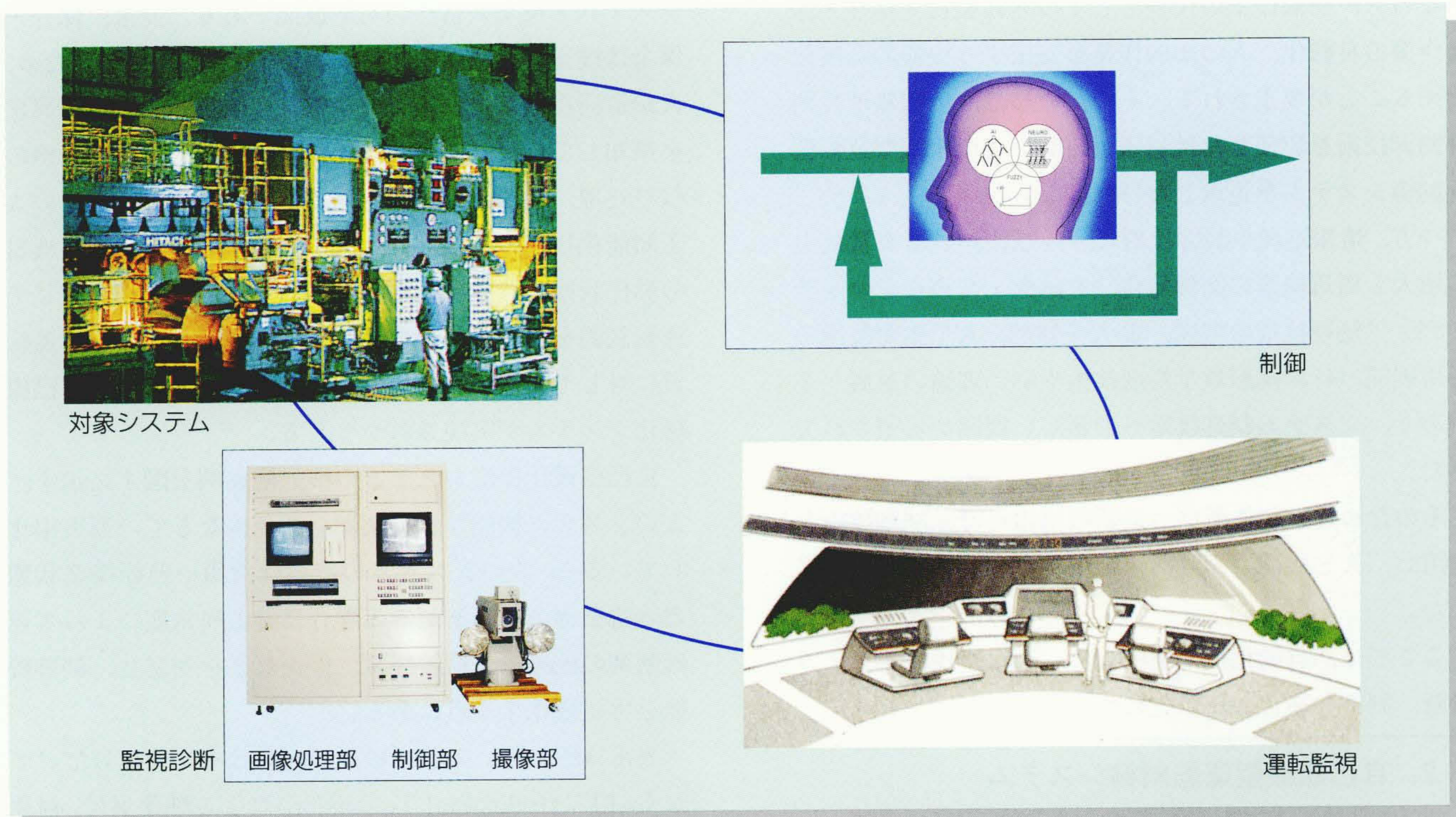


人と機械の協調を目指した知的システム制御

Intelligent System Control Techniques
for Cooperation of Machines with Humans

諸岡泰男* *Yasuo Morooka*
林 利弘** *Toshihiro Hayashi*
船橋誠壽*** *Motohisa Funabashi*



人と機械の協調を目指した自己組織化運転制御システム

映像、音響などのマルチメディアを利用した監視診断、人工知能や最新制御理論を駆使した高性能制御、および人にやさしいオペレーションにより、システムの高度化に対応している。

産業システムの生産の自動化に加えて監視・保守・保全の自動化、および人の知的作業支援機能の向上が重要になっている。しかし、これらは非定常的作業であり、人の五感やノウハウに頼っている点が多く、モデル化が困難なため、新規な情報処理技術の適用による自動化技術の実用化が切望されていた。

このようなニーズにこたえるため、(1)人間の五感に代わる映像、音響等のマルチメディア利用技術、(2)運転員のノウハウを反映するファジィ処理、ニューロ処理等の人工知能応用技術、さらに、(3)スケジューリング、異常診断等への適用が進んでいる免疫処理、遺伝子処理等の

人工生命応用技術の実用化を図ってきた。また、生産・加工などの制御を精密に行うためのモデル化技術、最新制御理論の実適用、人工知能技術との組合せ技術を実用化し、制御の高度化を進めてきた。

これら個々の技術を統合し、保守・保全の自動化、設備診断結果に基づく制御システムの再構成、制御機能間の協調をとって、人の介入を最小限に抑える自己組織化システムを構築している。

21世紀に向けてのシステムを構築していくうえで、「人にやさしいシステム」を目指した技術開発をさらに促進していく。

*日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士 **日立製作所 大みか工場 技術士(情報工学部門) ***日立製作所 システム開発研究所 工学博士

1. はじめに

近年、プラントシステムでの熟練作業の伝承性、人間尊重型のシステム構築など、21世紀に向けての課題が数多く指摘されつつある¹⁾。人と自動化機器との協調性、役割分担などを見直し、自動化機器との共存による人の物理的・精神的作業環境を改善することが不可欠となる。すなわち、熟練作業の代替としての運転監視・保守・保全作業の自動化、人の知的作業を支援する機能の高度化を図ることが要求される。そのためには、情報処理技術や制御技術を駆使した付加価値の高い自己組織型運転監視制御システムを追求しなければならない。

一方、情報処理や制御技術の分野では、(1) 計算機能力の増大と周辺機器の高機能化、(2) 画像・音声などマルチメディア処理技術の進展、(3) 人工知能、人工生命技術の応用展開、(4) 非線形数学処理技術や制御理論の進展などがあり、システム制御技術への新しい展開が切望されていた。

そのため日立製作所は、最新の情報処理・制御技術を適用し、人と機械の相互関係を重視したシステムを確立した。

ここでは、自動化技術を中心に、運転監視、システム診断、制御の高付加価値化について述べる。

2. 自己組織型運転制御システム

鉄鋼業、プラント、FAをはじめとする各産業システムは生産の自動化を中心に発展してきた。設備保全や異常操業への対応などに対しては自動化が困難で、人手の介入を必要としているのが現状である。しかし、今後の産業システムを支えていくうえで、表1に示す課題を解決していかなければならない。(1) 熟練技術者の不足や若者の現場離れに対して技術・技能の伝承をいかに行うか、

表1 産業界の主な課題とシステム要求機能
産業界の今後の課題とシステムでの対応策の例を示す。

産業界の抱えている課題	要求されるシステム機能
熟練技術者の不足による技術・技能の伝承体制	運転・保全業務の自動化の追求と訓練システム
職場環境の快適化と機械的作業、重労働作業の排除	通信、マルチメディアを利用した運転支援機能、夜間無人運転化など
国際競争力の強化	低コスト生産へのシステム化、インターネット利用による国際的即応体制のシステム化
地域との共存性 ほか	環境調和、地域支援

(2) 作業環境の改善や人と機械の作業分担を見直して、より高度な知的作業を人に分担させる、などの課題に対しては、システムの自動化範囲を拡大し、保守・保全業務の自動化、人の知的作業を支援する機能の向上などが必須である。さらに企業活動としては、国際的競争力の強化、地域社会との協調などの課題もある。

自動化、運転支援で今後必須となる機能に保守・保全システムと操業異常への対応機能がある。従来、保守・保全は機器の異常音や目視による確認作業が必要なため、人が巡回点検したり、センサ信号を監視して機器の異常を察知していた。しかし後述するように、映像や音声の信号処理、ニューラルネットワークやファジィなどの人工知能化技術の進展により、システムの運転状態、機器の動作状態の診断監視が可能となり、その状態に応じて運転制御を変更したり中止することができ、さらに運転員に対して異常原因の追究、解析などを支援する自己組織化システムが実現されつつある。

自己組織化操業システムの機能構成例を図1に示す。このシステム機能は鉄鋼制御システムなどで一部実用化している²⁾。このシステムの特徴は設備や運転操業状態の診断を行い、異常がある場合はその異常度によって運転制御の縮退、負荷の軽減、停止などを判定し、制御機能を再組織化する点にある。

異常診断に用いる状態観測データはセンサ信号だけでなく、ITV(Industrial Television)による映像信号、対象システム内で発生する音響信号なども利用する。

再組織化機能は、設備の異常(故障)と運転制御状態の異常(操作と制御結果の不釣り合い)との関係から操業の持

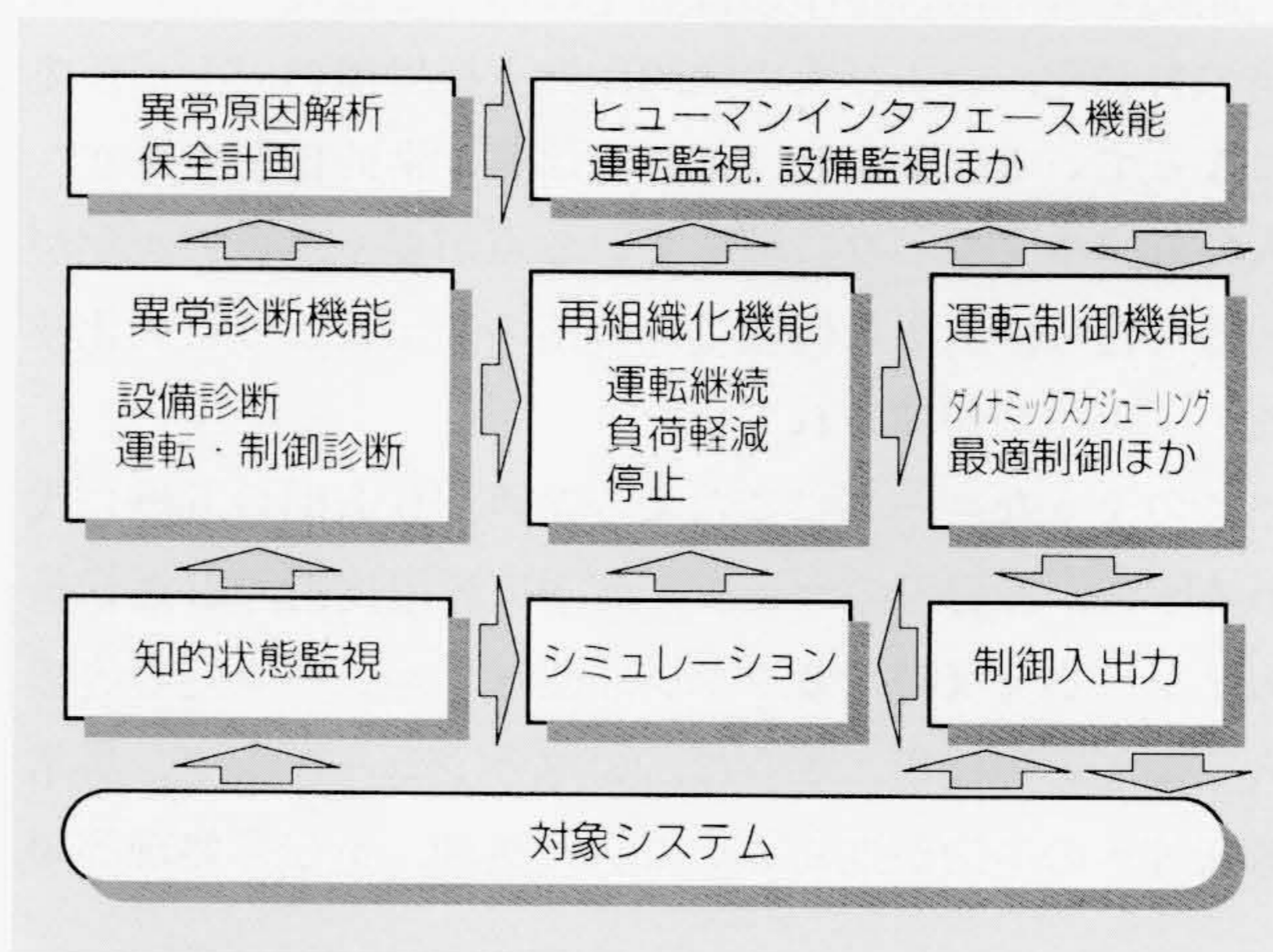
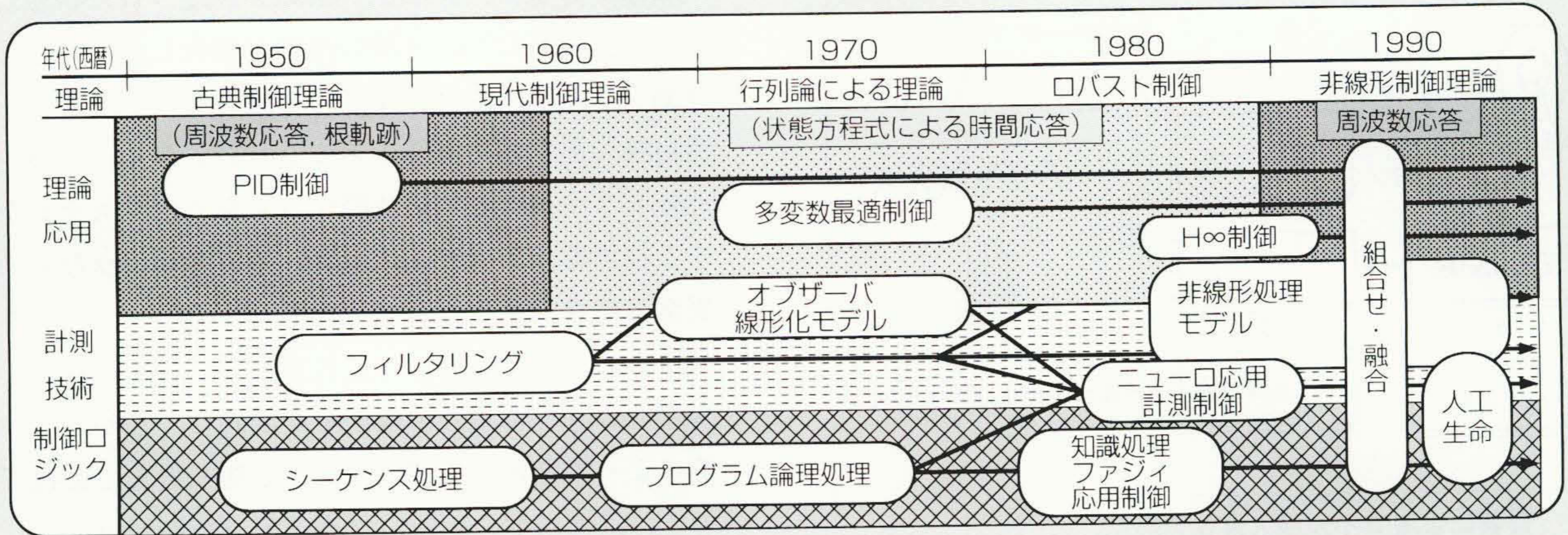


図1 自己組織型運転監視制御システムの構成例

設備・操業の監視診断と制御システムを連携し、システムの自己組織化を図っている。



注：略語説明 PID(Proportional, Integral, Derivative)

図2 制御技術のトレンド

古典制御理論から現代制御理論，H ∞ 制御理論へと発展するとともに，生体の情報制御処理のメカニズムを模倣したアルゴリズムが実用化され，計測・制御・システム運用の技術が高度化している。

続性を判定する。その場合，シミュレーションで判定結果に対する評価を行っている。

異常原因解析機能では，観測した映像情報の再生，センサ信号の周波数分析，信号間の相関分析などのソフトウェアツールを備え，対話型に設備の故障を分析し，補修計画を立てる。

運転制御機能では，再組織化機能からの運転条件に応じて制御仕様を決め，スケジューリング制御，セットポイント制御，シーケンス制御，状態フィードバック制御などで生産，加工のための操作を行う。適用する制御技術については種々の方法が実用化されているが，後述するように，各手法の特徴を生かした組合せ，融合が必要である(図2参照)。

このシステムの基幹となる技術を以下に述べる。

3. センサフュージョンによる状態監視

設備の故障や運転操作のミスによる操業異常の検知は，従来，人の五感によるものが多く，また，多くの情報を総合的に考えなければならないために自動化が困難であった。しかし，最近の映像処理技術，音声処理，計算機能力の進歩などにより，多くの情報を総合的に判断する「センサフュージョンによる状態監視」が可能となった。

プラントや工場内の多くの設備を維持管理するために，これまでは管理担当者が現場に出向いて点検していたが，作業環境の改善，点検の迅速化などの点からITVによる映像監視が行われるようになってきた。しかし，

	概要	効果
監視制御	監視(状況把握) 映像 → トレンドグラフ → 映像指示 → 点検履歴	映像・音と制御データ，図面などを関連づけて参照することによる総合的状況把握
	機器操作 映像 → 映像指示 → ポンプ起動・停止 / 止水扉開度制御	現場に居る感覚で機器操作
	ビジュアル化 映像 → 映像グラフィック → 制御情報(水位, ポンプ回転数, 吐出し流量)	目に見えない機器内部，現象のビジュアル化による適確な状況把握
仮想巡回点検	カメラ制御 映像 → カメラ切換(ズーム, 画面角) → ITV制御 → 図形・映像指示	実際に歩き回る感覚で場内点検
	映像履歴検索 映像 → SP → 履歴検索 → 映像DB / 数値DB	正常運転時と現状の映像・音・制御データの比較による異常の早期発見
	点検マニュアル 映像 → 点検リスト → 点検箇所表示 → 点検報告書作成 / 音声メモ	点検リストに加え，映像上で点検箇所・内容を表示し，結果を音声メモに残すことによる確実性の向上

注：略語説明 DB(Database)

図3 マルチメディア応用監視制御の例

映像・音・制御データ，図形などを関連づけ，現場を巡回する感覚で設備や運転状態を把握する。

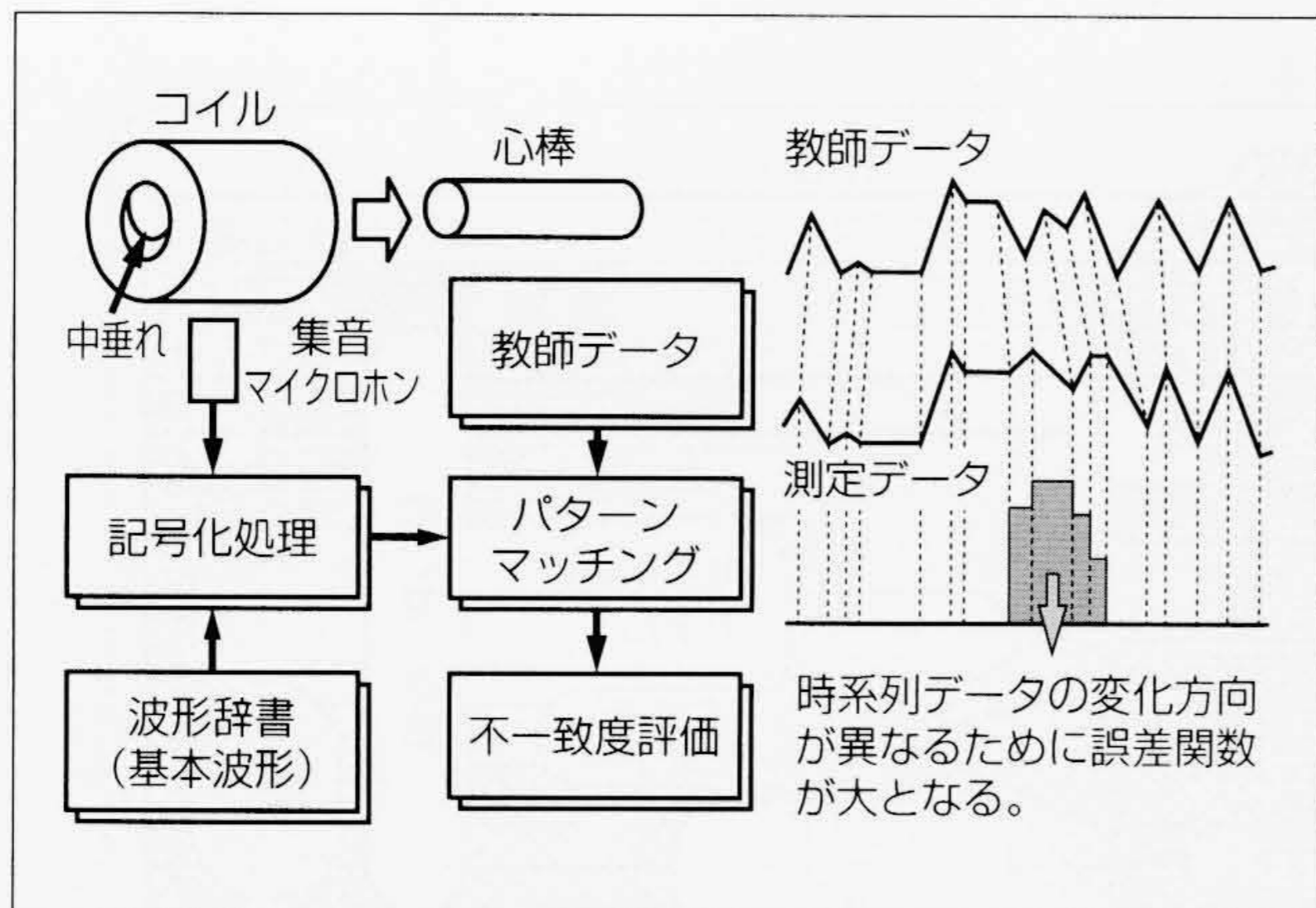


図4 音響によるコイル挿入異常診断例
音響測定データを上昇、下降などの記号に変換し、教師データと比較して不一致度を判断する。

多種多量な情報を短時間のうちに処理しなければならない監視業務では、映像情報だけでは不十分である。これは人間の知覚の一部しか利用していないためであり、多くの情報を総合的に判断するにはセンサ情報、音声など、より多くの知覚情報を利用して直観的に状態を把握できる、マルチメディアを利用したセンサフュージョン技術が必要である。

マルチメディアを利用した監視システムの例を図3に示す³⁾。これは下水道施設の監視例であり、下記の特徴を持つ。

- (1) 設備の駆動音や映像によって仮想巡回監視が可能
- (2) 水位やポンプ回転数などの制御情報、設備図面と音、映像情報との関連づけを監視画面上で統合
- (3) 機器内部現象のビジュアル情報と多種情報による総合的異常診断が可能

上記システムによって広域に設置されたポンプ所などの施設を集中監視し、遠方操作で降雨時などの水の流入調整や施設の点検を行っている。

音響データによる診断例として、圧延コイルの搬送過程でのシステムを図4に示す。コイルを心棒に挿入するとき、コイル内側の端部が中垂れしていると心棒に突っかかり、コイル内部を押し出したり挿入することができなくなる。そこで、映像でコイル状態を監視するとともに、心棒挿入時の音をマイクロホンで収集し、その音響データを基本波形に基づいて記号化して正常時の教師データと比較する。信号の記号化では入力信号の変化方向を「上昇」、「下降」、「平坦」などに分類する⁴⁾。その記号と時間長の教師データとの差異を誤差関数とし、その大きさをパターンとの不一致度を求める。不一致度の大きいほど異常度が高いと判定する。

映像、音響データと制御情報を関連づけた状態監視について上述したが、多種の情報を統合してその関連性を評価するため、計測情報間の相関性が弱い場合は、検出器自身の異常の可能性もあると判断できる。したがって、運転ミスや機械設備の故障だけでなく、システムを構成する検出器、アクチュエータ、コントローラなどの動作異常の総合的監視も可能となる。

さらに、仮想巡回では監視室からの遠方操作によって少ないカメラで複数の場所を、同時に、しかもズーム機能によって全体から詳細映像へと切り替えて監視できるので、巡回時間の短縮、保全業務の軽減が可能となる。

4. 知的操業診断、運転支援の高度化

状態監視では、主として制御情報(温度、圧力、厚みなどの制御量と開度、回転数、電圧などの操作量)から運転制御状態の監視を行い、映像、音響情報を主体とした情報から設備の稼動状態の監視を行っている。しかし、操業の継続性を診断するためには制御状態と設備状態の両方から判断する必要がある。

設備状態が正常で制御がうまくいかない場合は、運転制御条件、制御仕様、あるいは制御パラメータの設定不良などが往々にして多い。このような場合は、制御仕様の変更やパラメータの調整を行って運転を続行している。

設備の異常が軽微な場合は、異常設備への負担を軽減し、運転を続行したり異常設備を運転対象から除いてシステムを再構成し、運転を継続することが可能である。

設備異常が重度の場合は異常設備を除いた縮退運転を行うか、運転を中断する。このような運転方法をルール化してシステムを再構成する自己組織化機能の概念を図5に示す。

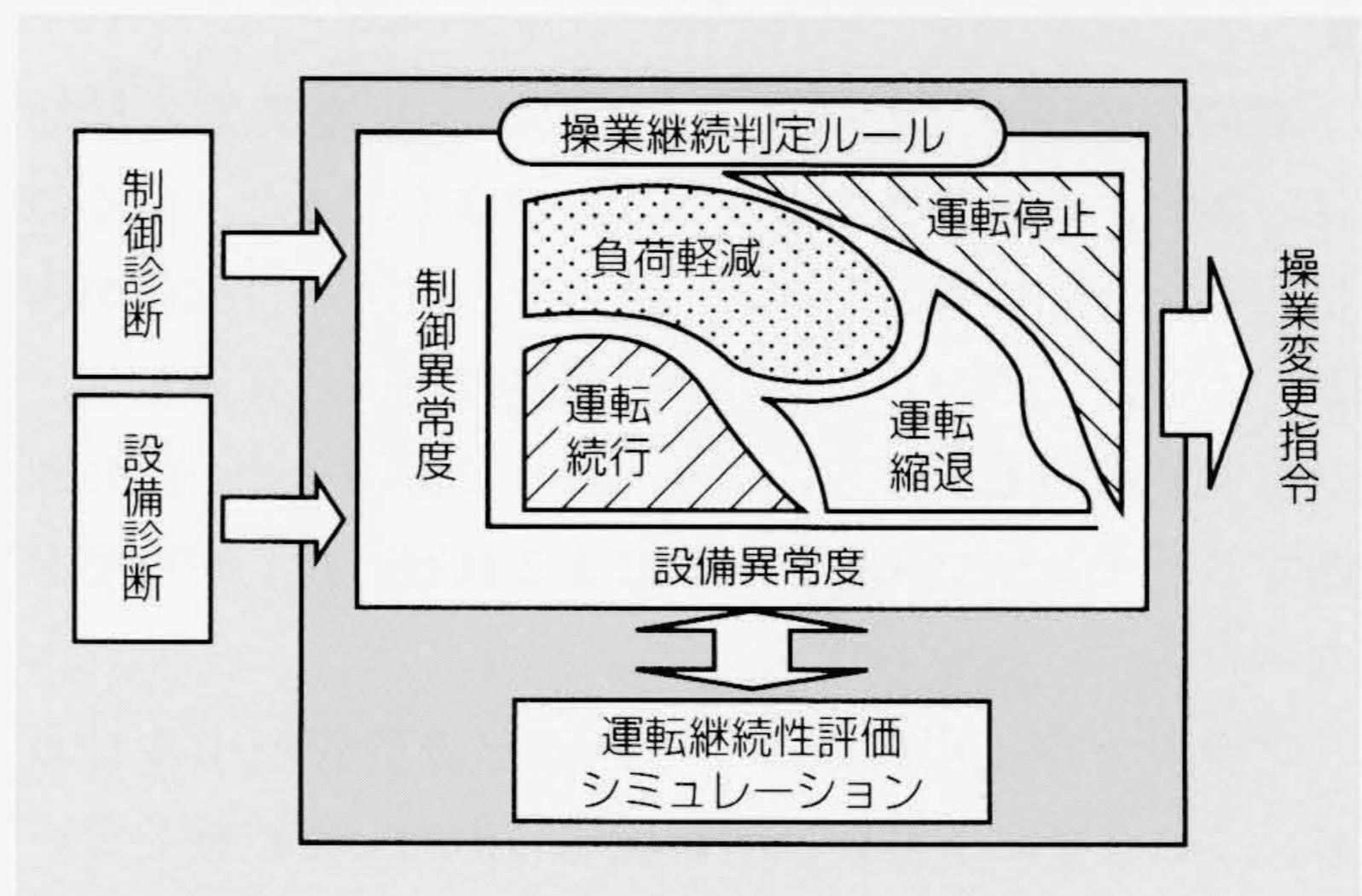


図5 システム再組織化機能
制御状態と設備状態の異常度に応じて操業を変更する。

制御異常，設備異常の状態がどの運転ルールに該当するかの判断は，FTA(Fault Tree Analysis)，相関分析法，ファジィ・ニューロなどの方法で下す。最近では免疫処理技術や遺伝子処理技術の応用が実用化されつつある²⁾。

制御仕様，設備の縮退化などを行った場合に，運転制御状態がどの程度の変更となるかを推定評価するのがシステムシミュレーション機能である。運転継続性の評価結果によって継続困難な場合は，制御・設備異常度を高め，設備上余裕のある場合は異常度を軽減して再評価する。継続判定の結果を運転制御機能への指令として出力する。

5. アドバンスド技術による制御の高度化

制御の基本となるのはフィードバック制御である。その基本となる目的は，(1)系を安定化する，(2)定常偏差を無くす(0にする)，(3)過渡応答波形を良くするという点にある。このような仕様を満足する制御器を設計する理論が制御理論である。

1950年代に体系化されたPID(Proportional, Integral, Derivative)制御を代表とする古典制御理論は，制御偏差に制御ゲインを乗じて操作量を求めるだけなので，非常にわかりやすい制御法である。

1960年代には最大原理による最短時間制御，2次形式評価関数を最小化する最適出力フィードバック制御(LQG制御)が盛んに研究された。制御対象も多入力多出力系が対象となり，1970年代には状態フィードバック制御を中心に，行列を扱った理論が中心となった。

しかしこの理論では，(1)モデル化誤差を考慮できない，(2)外乱に対する設計が困難，(3)パラメータが固定な

システムを対象とするなどの制約が実用化するうえでの課題であった。

1980年代に入ってモデル誤差や外乱に対する安定性が重要視され，時間応答評価に代わって再び周波数応答性が評価値として注目された。この制御系設計法として H^∞ 制御理論が大成された。この理論は，全周波数領域で入出力間の最大伝達ゲインを所定の値以下に制御するためのコントローラを設計する理論であり，モデル誤差や外乱に対して安定な制御系を構築することができる。

上記制御理論を適用した制御系の基本構成を図6に示す。同図では，複数台の圧延機(多段圧延機)での制御をベクトル的に表している。基本となる状態フィードバック制御の設計には多変数制御理論， H^∞ 制御理論を適用している⁵⁾。モデル誤差やオフセット誤差による制御量の定常偏差に対して積分フィードバック制御を行い，さらに，推定可能な外乱(図では入側板厚)に対しては制御偏差の発生量を予見し，その予見値でフィードフォワード制御(予見制御)を実施している。

上記各制御機能によって決定された操作出力は，そのままアクチュエータに出力してもよいが，制御ループ間での干渉によって応答性の悪化や制御偏差の拡大を招く場合もあり，非干渉制御が行われることが多い。図6に示すシステムでは，サブシステム単位(圧延機ごと)に分離して制御系(制御ブロック)を構成するため，ブロック化非干渉制御を実施している。

以上，制御理論の発展経緯と理論に基づいて構成された制御システムおよび制御方法について述べた。一方，モデル化が困難な問題や，分布状態の計測，制御ロジックの問題などに人工知能技術が適用され，1990年代以降，制御の考え方，制御システムの構造も新しい時代に入ってきた。

ファジィ処理，ニューラルネットワークに代表される人工知能技術は，運転員のノウハウ利用や数学モデルの構築が困難なシステムに対して有効な計測制御技術である。ニューラルネットワークは空間的，時間的に分布した状態の認識を，ファジィ処理は複数の信号を比較調整してバランスをとった出力をそれぞれ求めるのに適しており，これらを組み合わせてシステム化することが多い。その一例で，圧延機の形状制御に適用した例を図7に示す⁶⁾。

この制御では，従来運転員が目視で確認していたセンサ出力分布をニューラルネットワークを適用することによって自動的に把握し，しかも運転員のノウハウである

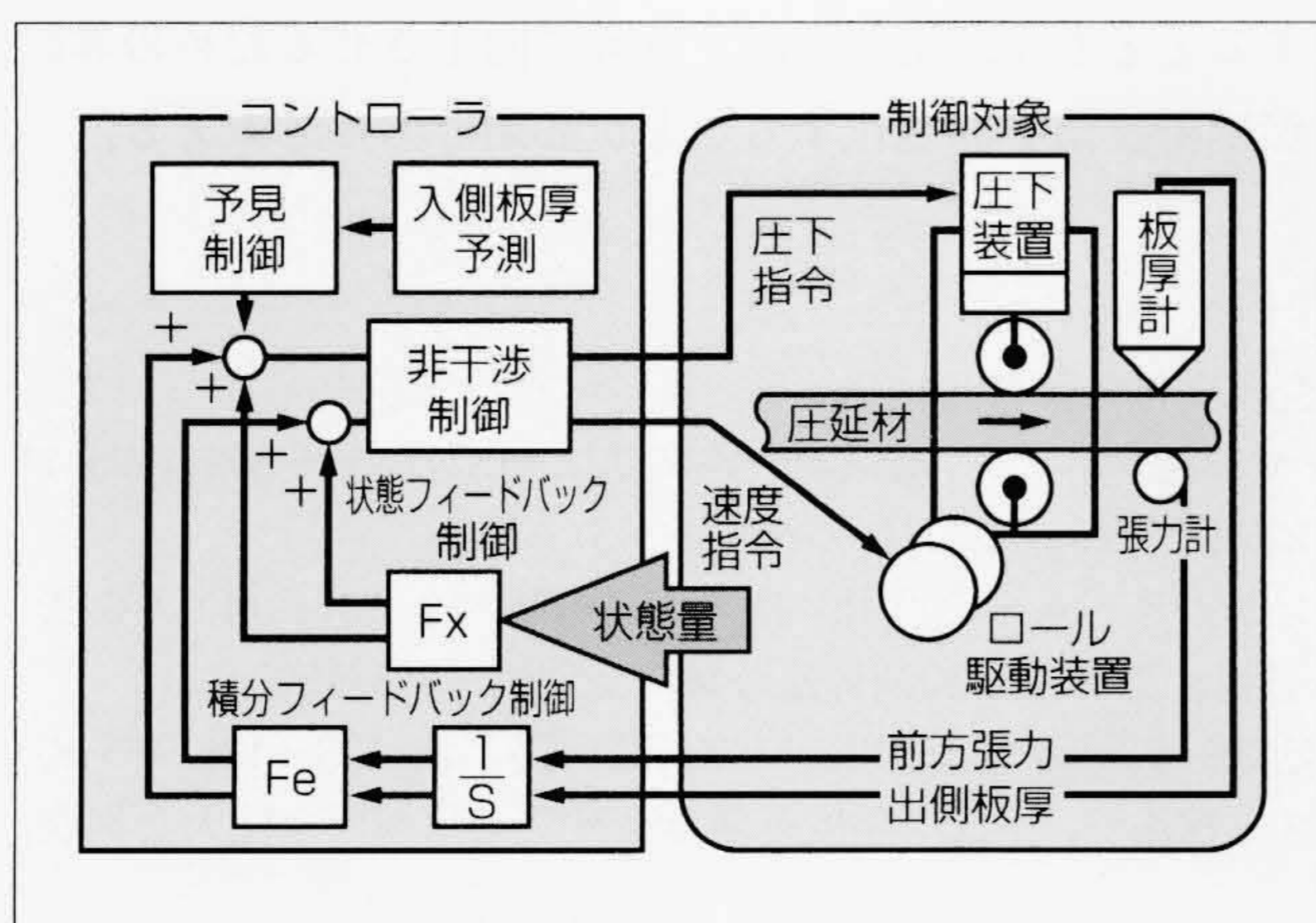


図6 制御系の基本構成例

状態フィードバック制御を基本として定常偏差フィードバック，予見制御，非干渉制御で構成する。

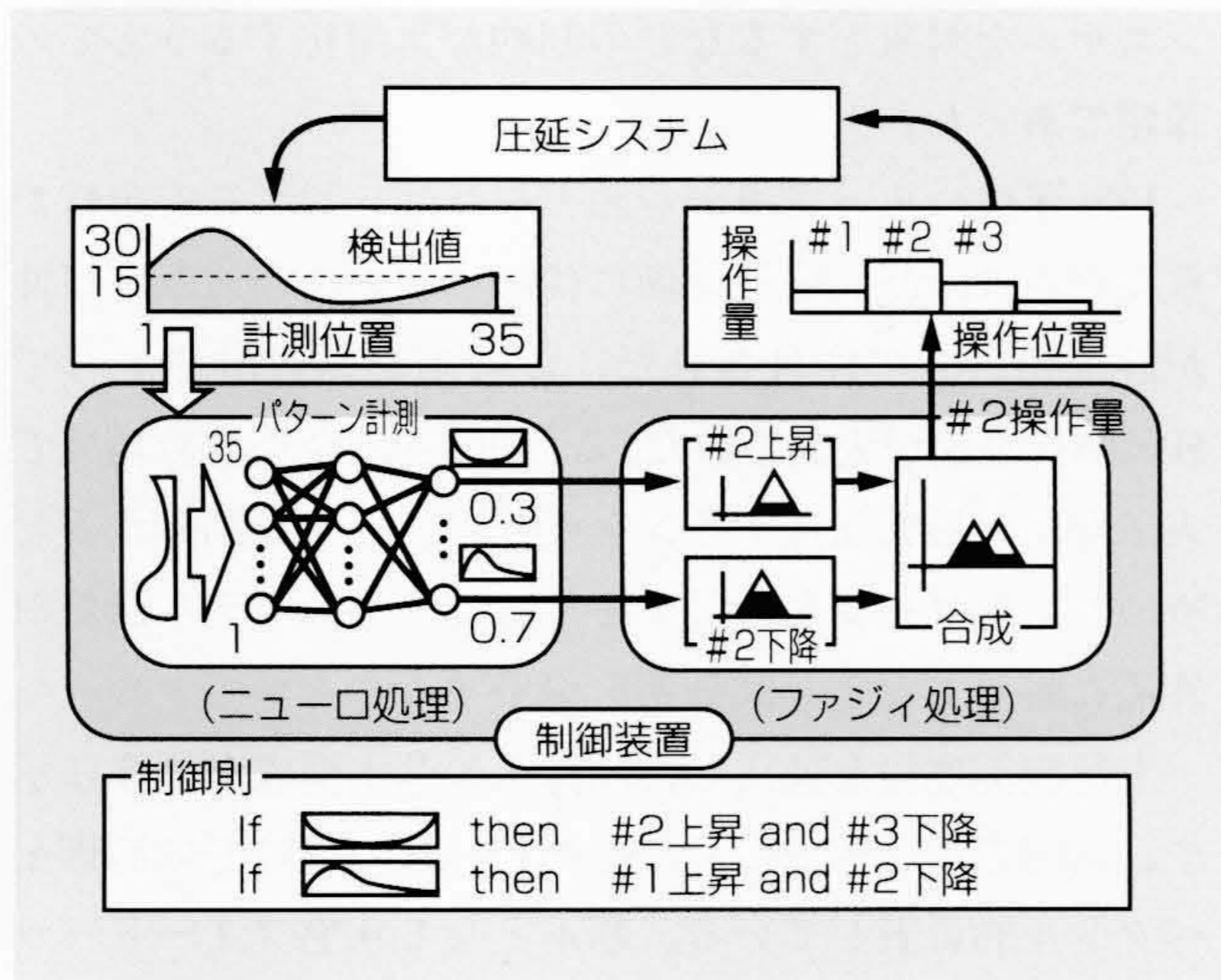


図7 ニューロ・ファジィ制御の例
ニューロで計測波形を基本波形に分類し、基本波形ごとの含有比率をメンバシップ関数に入力して対応する操作量を決定する。

基本波形ごとの操作をファジィルール化することによって実現した。これは、制御状態が空間的に分布し、複数のアクチュエータを操作する計測制御システムへ適用した一例である。そのほか、ニューロ・ファジィ処理技術は、オートチューニング、最適探索、モデル構築など種々の制御機能の高度化にも適用されている。

今後の技術動向として、カオス、ウェーブレット変換などの技術が、非線形振動現象や信号処理の新しい技術として注目されており、さらに、生体系の群行動やリズム同調、人工生命などの技術の工学的応用が検討されている⁷⁾。これらは今後のシステムをより高度にするうえで、計測制御のモデル化技術として必須の技術と考える(図8参照)。

6. おわりに

ここでは、監視-保守・保全-制御を中心に、自己組

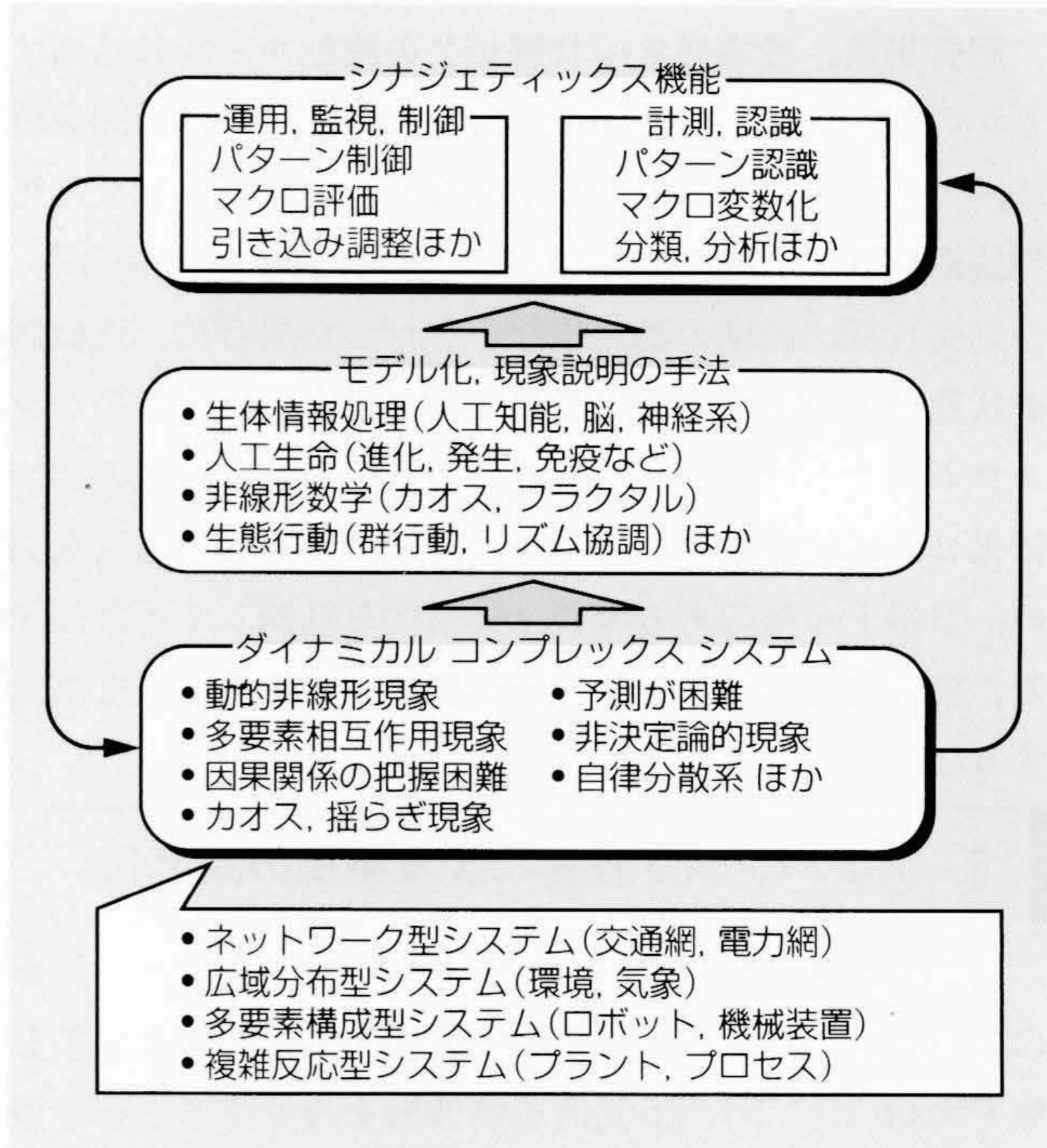


図8 今後のシステム制御での課題と対応技術
対象の動的自律的現象を微細に把握して制御するため、生体系の制御技術や非線形数学技術の実用化が必須となる。

織型システムの提案と監視-制御での高度化技術の現状, 21世紀に向けてのシステムのあり方について述べた。

システム制御の高度化は、人と機械の協調をいかにかにるかにある。熟練労働者の減少、単純作業・危険作業・重労働作業からの人の介入作業の削減、人の運転・保守での作業性・快適性向上などに対して、自動化の拡大、機能の高度化、人の知的作業化のための支援システムの充実を図っていかなければならない。そのためには、従来、人の五感とノウハウに頼っていた部分を、マルチメディアの利用や人工知能・人工生命技術の適用で自動化するとともに、制御性能をさらに向上させるための非線形制御技術を高度化することが必須であると考えられる。

参考文献

- 1) 機械振興協会, 日本鉄鋼連盟: 人にやさしい製鉄技術に関する調査研究報告書(1994-4)
- 2) 鹿山, 外: 免疫ネットワークとベクトル量子化を組み合わせたセンサ診断システム, 電気学会論文誌D, 115, 7, 859~866(1995-7)
- 3) 諸岡, 外: マルチメディアの社会システムへの応用, 電気学会論文誌D, 115, 5, 521~524(1995-5)
- 4) 川口, 外: トレンド変化検出技法と化学プラント・インテリジェントアラームへの適用, 日立評論, 75, 2, 137~140(平5-2)
- 5) 岡田, 外: H ∞ 制御理論による冷間圧延機の板厚/張力制御ゲイン設計, 第38回自動制御連合講演会別刷, 275(1995-12)
- 6) 中島, 外: ニューロ・ファジィ応用パターン計測・制御技法の圧延機形状制御への適用, 日立評論, 75, 2, 133~136(平5-2)
- 7) 諸岡: ダイナミカルコンプレックスシステムとシナジェティックス-総論-, 平成7年度電気学会産業応用部門全国大会別刷, S87-S88(1995-8)