

インテリジェント・モーション・コントロール

Intelligent Motion Control

富塚 誠義*・橋本 秀紀**

Masayoshi TOMIZUKA and Hideki HASHIMOTO

モーション・コントロールは制御理論をベースに物を動かす技術一般をさす。実現には高速演算可能なマイクロプロセッサ (DSP 等) が用いられる。次第に重要性が増す中で、モデルの曖昧さに対処する方法として誤差を許容するロバスト化と誤差を小さくしていくインテリジェント化の2つの方向が意識されてきている。本稿ではこの2つの方向を概観しモーション・コントロールの新しい研究テーマとしてのインテリジェント化に関して述べる。

1. モーション・コントロールとは

モーション・コントロールとは制御理論¹⁾を基礎とし、マイクロプロセッサ等の高速演算デバイスを用いて制御アルゴリズムを実時間で実行し物を動かす技術一般を指す²⁾。小さいところではマイクロメカニズム、そしてサーボモータのコントロール、大きなところでは宇宙構造物の振動抑制まですべてのロボティクスおよびメカトロニクスの基礎となる大変重要な基礎技術として意識されてきている³⁾。近年、この分野はロバスト制御およびインテリジェント化を中心として進んだ制御理論の成果と DSP 等による高速演算処理との結びつきによって著しく進んでいる。同時に、産業界にも大きなインパクトを与え、従来のハードウェア主体の開発から制御演算・信号処理といったソフトウェアにも重点を置いた開発が多く見られるようになってきている。しかし、現実には単なる理論の応用ではうまく動かず、対象の物理的・力学的特性を考慮した設計開発が必要とならざるを得ない。現在、数多くの研究者がこのギャップを埋めるべく研究を進めており、多くの成果を基に次第に体系化が進められつつある。

このときキーワードとして考えられるものに次に示すロバストおよびインテリジェントという言葉がある。

・**ロバスト**：これは頑健という意味で、制御系に外乱やパラメータ変動が生じても制御出力に要求される仕様に影響が及ばないようすを表す。現在の制御は制御対象のモデルに基づいて設計されるので、制御対象のモデル化誤差を許容する制御といえる。

・**インテリジェント**：これは知的と訳され、物わりの

良いという意味である。制御系でいうと、制御対象のモデル化誤差を小さくする方向に努力する系である。同定・推定機構はその最たるもので相手を良く知る努力である。適応機能は相手を知った上で自分自身をそれに応じて変える努力である。

ロバスト、インテリジェントいずれにしろ制御対象へのアプローチの方法である。最も賢明な制御手法はロバスト性およびインテリジェント性を組み合わせることである。たとえば外乱に対処するには、インテリジェントな信号処理によってできるだけ推定して、取り除けなかったものをロバスト性によって抑圧することである。

表題の「インテリジェント・モーション・コントロール」に関してであるが、近い言葉に「インテリジェント・コントロール (知的制御)」「インテリジェント・メカトロニクス」がある。前者は AI 的手法 (静的な組み合わせ) による推論・判断等の機能を有する制御システムを主に扱っている⁴⁾。動的システムを中心に扱うモーション・コントロールの分野とはかなり異なる。後者は本稿のように動的システムを対象としているが、主にロボット等に代表されるメカニカルなシステムのみを対象とする。

2. 自動制御工学の寄与

モーション・コントロールを支えるのは電気工学、機械工学そして自動制御工学である。前者の2つに比べて自動制御工学は学際的な分野である。一時、方法論全盛の時代には制御工学者は工学的には根無し草でアイデンティティーに欠けるという自己批判があった。しかし、1990年代の制御分野を眺めれば応用数学系、電気系、機械系、航空系、化学系といった具合に色々な流派が存在し、どの流派に属するかが制御工学者のアイデンティ

*カリフォルニア大学

**東京大学生産技術研究所 第3部

ティも決めているように見える。しかも、マイクロプロセッサや CAD Tool が著しく発展して、シミュレーションや実験を通して理論を検証することが容易になったので、この流派の立場からは制御工学による方法論に勝る方法はないと主張する感じもある。良くも悪くも自動制御工学の提供する方法論が計算機の発展により目に見える形で評価される段階になりつつある。

3. 制御工学における電気系と機械系

モーション・コントロールでのキープレイヤーは制御工学者の中でも機械系と電気系の人達であるが、その両者の研究の方向（嗜好）には若干の違いがあったようである。

以下はステレオタイプの話（わざと議論を誇張すること）である。従来の電気系の電動機に関する研究は、電動機その物を対象として電力変換機（チョップ、インバータ等）に力を注いでいた。いわゆるパワーエレクトロニクスである。もちろん制御の研究も行われていたが、電動機に加わる負荷の変動や慣性の変動等を考えており、モータ軸にどのようなメカニズムが繋がれているかは意識していなかった。すべてトルク変動として考えていたわけである。一方、機械系はメカニズム主体でアクチュエータを単にトルク発生機としか考えておらず、動特性を持った対象とはみていなかった。このような状況が、近年のメカトロニクスに見られる機械系・電気系の融合のもとに、電気系は電動機その物の制御から次第にメカニズムまで対象とした機械システムとしての制御へ、そして機械系はメカニズムオリエンテッドからより早い応答を有する電気系までを含めた制御システムへと推移してきて、次第にオーバーラップしてきている。

このことは、ロボットの制御を見ているとわかる。ロボットアームが機械工学者によって研究対象として意識されたとき、メカニズムが最初であり、その解析手法としての座標変換（なぜか同次変換が主流になっている）が整備され、作業空間での動作が関節空間での指令値に分解されていった。いわゆる、分解速度法、分解加速度法としてまとめられ計算トルク法として知られている。ここでは、アクチュエータは計算トルク法によって得られた指令トルクを忠実に発生する物である。一方、電気工学者は長く電動機の制御に従事してきており、また、交流電動機というやっかいな物（交流理論は難しい）を抱えていたのでサーボモータにつなげられたメカニズムはすべて一様に負荷として考えていた。これはロボットアームを対象としても同様で、複雑な座標変換を好まず動作によるトルクの変化は信号処理（観測器等）によって取り除くか、適当な過渡特性のもとに許容してしまうという方向へ向かった。図1にこの関係を示す。ここに述べたことは、現在両者の研究がオーバーラップしてきて

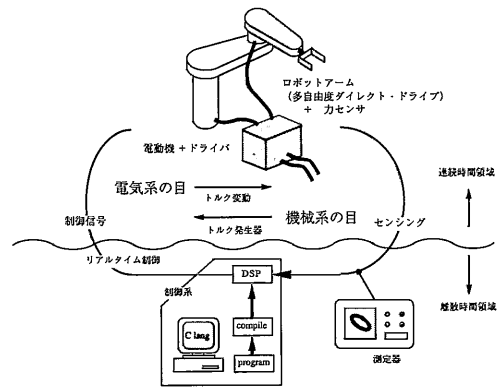


図1 電気系・機械系

いても依然傾向の違いとしてみられる。

4. 制御理論からみたモーション・コントロール

制御工学の大きな特徴は制御対象をその物理的存在から抽象化した数学的表現に変え設計を行うことである。最初に数式有りきである。実現に関するさまざまな制約（非線形性、飽和、有限語長問題等）が表現されていれば、完璧な設計そして実現が期待できる。しかし、往々にして実対象に対する経験不足あるいは状態変数と実際の状態（電流、電圧等）の対応のずれから見通しの良い設計を与えているとは言い難い。

本稿ではさまざまな制御方法論をモーション・コントロールの立場から分類し、特に役に立つと思われるものを簡単に紹介する。この方法論のうちのいくつかは電気系・機械系の人達によりモーション・コントロールを念頭に提唱されたものである。他の分野の人達（航空系、化学系等）により提唱されたものも勿論あるが、これらについてはモーション・コントロールへ応用する際にはそれなりの手直し調整を加える必要がある。

さて電気系、機械系の違いとは別にここでコントローラの世界と物理系の世界の本質的な違い、すなわち連続時間世界と離散時間世界についても考える。制御理論に連続時間理論と離散時間理論があるのは周知のとおりである。制御則の実行ということになると、現在ではほとんどコンピューターを用いるので離散時間の世界となる。設計法としては、連続時間理論を用いて実行段階で離散化を行う方法（間接法と言われる）と物理系を始めから離散時間領域でモデル化して離散時間理論を適用する方法（直接法）が知られている。どちらも一長一短ではあるが、どのような設計を行ったとしてもサンプリング時間の挙動が解析されているとは言えない。ロボットのような非線形システムを対象としたときに、線形制御理論で良く知られたサンプリング定理がそのまま使えないので注意が必要である。

5. モーションコントロールの基本的な考え方

図2にフィードバック制御系の基本図を示す。制御対象は線形・非線形を問わず正確にわかっているものとする。操作部が電動機となる。このフィードバック制御系に要求される基本的な特性は

- (1) 系が安全であること。
- (2) 制御対象の出力(制御量)と目標値との差を、十分時間が経過した定常状態において0に近くすること-一定常特性。なお、モーション・コントロールでは軌道に沿って動かすこと(Tracking)が重要である。
- (3) 制御対象の出力と目標値との間に偏差が存在する場合、過渡状態に於いて、その偏差を速やかに減じ(速応性)、もし行き過ぎを生じた場合、行き過ぎを少なくし、しかも行き過ぎを速やかに減じる(減衰性)こと-過渡特性

これらの特性を満足するように制御装置(各種補償器、センサ、アクチュエータ)を決定することを制御系設計という。また、制御則とは制御装置内で調節可能なパラメータを定める論理をさす。

ここに示した指標(特性)がどのように満たされているかを見ればその制御系の性能を評価できる。その際、周波数領域で考えると見通しが良くなる。次に、周波数領域での評価に関して考える。

制御対象を線形系で1入力1出力として図3に制御系を示す。この伝達特性は

$$Y(s) = G_{ry}(s) R(s) - T(s) \xi(s) + S(s) P(s) d(s) \quad (1)$$

ただし、

$$G_{ry}(s) = [1 + P(s) C(s) FB(s)]^{-1} P(s) C(s) FF(s)$$

$$T(s) = [1 + P(s) C(s) FB(s)]^{-1} P(s) C(s) FB(s)$$

$$S(s) = [1 + P(s) C(s) FB(s)]^{-1}$$

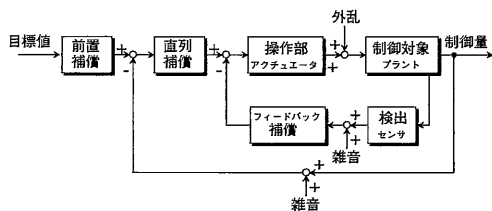


図2 フィードバック制御系

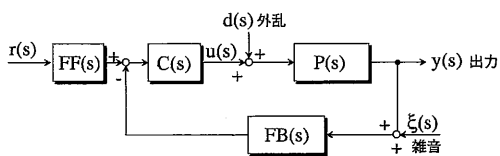


図3 線形フィードバック制御系

となる。このとき、どのような構成をとっても

$$T(s) + S(s) = 1 \quad (2)$$

なる関係がある。ここで、すべての周波数帯域で目標値伝達特性 $G_{ry}(s)$ を1にして、相補感度関数 $T(s)$ 、感度関数 $S(s)$ を0にできれば観測雑音、外乱に完璧にロバストな制御を実現できる。しかし、上に示した関係から $T(s), S(s)$ を同時に0にすることはできないので、高域で問題になる観測雑音 $\xi(s)$ に対して $T(s)$ をローパス特性にして影響を抑える。又、低域で効いてくる外乱 $P(s)d(s)$ を抑えるために $S(s)$ をハイパス特性にして低域ゲインを小さくする。 H_{∞} 制御はこのトレードオフをシステムチックに求めるものであり、ループ整形とも言われる。

なお、 $FF(s)$ はプリフィルタと呼ばれるもので $T(s), S(s)$ には関係なく $G_{ry}(s)$ にのみ関係して伝達特性を改善するものである。いわゆる2自由度系の構成になる。

多くのモーション・コントロールの手法も、つきつめるとこのトレードオフを如何に求めるかということである。モーション・コントロールの分野で現在研究されている主な手法を以下に示す。

H_{∞} 制御⁵⁾

H_{∞} 制御は閉ループの周波数特性を陽に設計できるという特徴を持つ。すなわち、雑音特性を表す $T(s)$ 、外乱特性を表す $S(s)$ を制約 $T+S=1$ を満足しながらループ整形(Loop Shaping)できる。 W_1 を微分特性、 W_2 を積分特性としたフィルタを考慮して、 $TW_1=1, SW_2=1$ とする設計(混合感度問題)を行うと、 T がローパス特性、 S がハイパス特性になり性能の良い系が得られる。

ループ整形は古典論においてもボード線図を用いたゲイン、位相進み、位相遅れ補償に見られるように最も理にかなった方法である。周波数領域で表現されたプラントに対して外乱、雑音の特性を考慮して整形を行い希望する動特性を得ている。

H_{∞} 制御においてループ整形の一般的な手法が与えられる。したがって以下に述べるすべての方法と組み合わせることができる。また、実対象への応用も議論されている。

適応制御⁶⁾

対象とする系の特性が変動あるいは未知な場合に、パラメータ同定、推定を行いながら制御器自身のパラメータまで最適に調節するものである。かなり限られたクラスに対してのみ有効であったが、ロボットのような非線形システムに対してもパラメータ空間と状態空間を直交させるようなパラメタリゼーションを行うことにより適用可能となった。このときの安定性も厳密に保証されている。一時ロバスト性が問題とされたがそれを克服する

手法も幾つか知られており、DSP 等の利用により十分に応用できるレベルにある。

予見・予測⁷⁾

予見・予測制御では未来目標を使えるという立場から図 3 の FF(s) に微分を認めることになる。すなわち、目標値については微分量までわかっているとするものでありマシニングなどの問題では妥当な仮定といえる。又、外乱の未来値もわかるならばフィードフォワード的に取り除くことができる。予測制御は本来プロセス制御を対象としていたがそのロバスト性に着目しモーション・コントロールへの適用が検討されている⁸⁾。

外乱推定オブザーバ⁹⁾

外乱 $d(s)$ を推定して取り除くことができれば出力への影響がなくなり好ましい。外乱の特性をステップ状と考えて 1 次増やした拡大系において観測器を構成して外乱を取り除く。外乱の周波数帯域に着目した設計法が知られている。これはいわゆる最小次元オブザーバと同一である。

速度を観測して外乱を推定する場合を考える。通常、制御工学者は制御対象のモデルが正確にわからないとオブザーバを設計できずかつうまく働かないと考える。しかし、モーション・コントロールでは、図 4 (a) で与えられる制御対象 (a, b, d が正確にはわかっていない) を大体正確そうな値 (公称値 a_m, b_m) で表現して mismatch ($a-a_m, b-b_m$) を等価外乱 \bar{d} に加える。

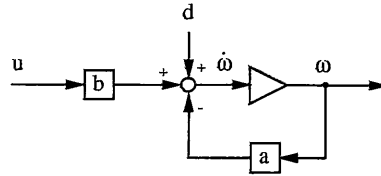
$$\bar{d} = (a-a_m)\omega + (b-b_m)u + d \tag{3}$$

この等価外乱を用いて図 4 (b) の表現を得る。 a_m, b_m は設計者にとって既知であるから外乱推定オブザーバを構成して \bar{d} を補償すれば制御対象は公称値である a_m, b_m に一致する。これは一種のモデル規範型の制御系と言える。理論的には全系の安定性に疑問が残るが、設計に大きな自由度を与えモーション・コントロールを著しく進歩させた。また、Time delay control として知られている手法も外乱の推定を行う点から同様の手法である。

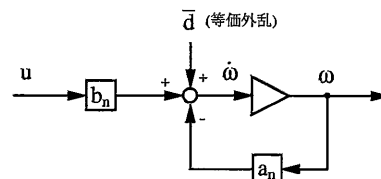
加速度制御¹⁰⁾

加速度制御は、加速度を指令値として制御を行う。出力は加速度の積分である速度、あるいはさらに積分である位置になる。このとき、伝達特性は一重および二重積分系になり、システムパラメータが消える。無くなる理由は上記のオブザーバによって負荷等を補償しているからである。図 4 (b) の a_m を等価外乱 \bar{d} に加えて考えると図 5 (a) になり、 \bar{d} を外乱推定オブザーバで推定して補償することにより図 5 (b) の加速度制御タイプの系を得る。この制御系はモーションコントロールに適しており、モデリングの労力を信号処理によって代価している。

まさに電気系の手法である。ロボットアームの軌道制御では、逆動力学を解かず各関節の位置指令値を求めてその 2 回微分 (微分する必要がない手法もある) を指令値として各サーボ系に与えれば良い。これは一種のモデル規範型の制御系と考えることもできる。また、この手法をベースにすると力制御、コンプライアンス制御も容易に実現できる¹¹⁾

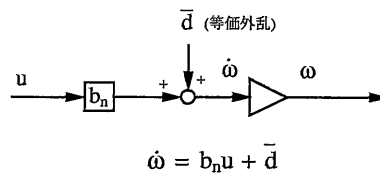


$$\dot{\omega} = a\omega + bu + d \tag{a)}$$

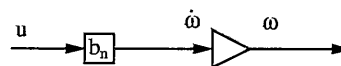


$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= a_n\omega + b_nu + \bar{d} \\ \bar{d} &= (a-a_n)\omega + (b-b_n)u + d \end{aligned} \tag{b)}$$

図 4 外乱推定オブザーバ



$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= b_nu + \bar{d} \\ \bar{d} &= a\omega + (b-b_n)u + d \end{aligned} \tag{a)}$$



$$\tag{b)}$$

図 5 加速度制御

可変構造系¹²⁾

可変構造系は、制御対象の状態に応じて制御構造そのものを変えることに特徴がある。たとえば、偏差が小さくなったら積分動作を働かせるということも可変構造系として定式化される。モーション・コントロールの分野で良く知られているのは Sliding Mode (滑り状態) であり、ハイゲインシステムの安定性を切り替え超平面 ($s=0$) におけるスイッチングによって確保している (図 6)¹³⁾。図に示すように制御対象が切り替え超平面 ($s=0$) に拘束されるので 2 次系の応答が 1 次遅れとなりオーバーシュートのない応答が可能となる。もし完全なスイッチングを得られれば最もロバストな制御系となる。特に、系全体が非線形系なので $T(s)+S(s)=1$ の束縛から逃れて $T(s)$ に拘らず $S(s)$ が理論的には 0 になる。しかし、実際にはスイッチングに遅れ等がありチャタリングを伴う。このチャタリングは機械系に悪い影響を与えるので、取り除く手法が考えられているが、取り除くとロバスト性が劣化するというトレードオフを持つ。また、LSI Chip によるハードウェア化による試みも進められており、高速なスイッチングによるロバストな制御の可能性が高まっている¹⁴⁾。

繰り返し制御・学習制御^{3), 15)}

モータのような回転体を含む機械システムでは、ダイナミック不均一や軸偏心により周期的な外乱が発生して誤差の原因となる。このようなときには、外乱が周期的であることから前のサイクルの誤差を利用して周期ごとに性能を改善することができる。繰り返し制御、学習制御はこれをシステムチックに行う。

線形化

機械システムにはいろいろな非線形性が現れる。バックラッシュ、飽和、非線形摩擦などは代表的なものである。これらの非線形性は級数展開をして一次項をとる線形近似によって線形化できるものではない。ロジックにより原理的に線形化できるもの (クローン摩擦、バックラッシュ)、本質的に線形化が不可能なもの (飽和、静摩擦) 等がある。

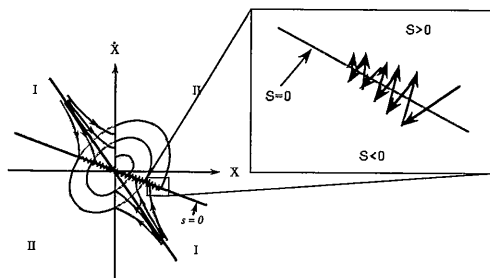


図 6 Sliding Mode (滑り状態)

線形化が不可能でもシステムへの影響を小さくすることはできる。特に、線形制御理論に基づいてコントローラを設計したときに、非線形項の影響を把握し取り除くことは必要である。ロボットにおける計算トルク法には非線形項をキャンセルして線形化を図る思想が明確にされている。また、それを一般化したフィードバック線形化の考え方もモーション・コントロールには重要である¹⁶⁾。

インテリジェント化

上記の手法は外乱を推定する、未来値を利用するといった低レベルのインテリジェント化であるが主にロバスト性に重点が置かれている。ここではさらに進んだインテリジェント化を考える。

インテリジェント制御に期待されるのは、不確実な環境下で複雑な制御対象が多極的な目的を実現するように制御することである。このとき、必然的に制御システムが階層化すること、また信号と言語表現が混在化することが考えられる。制御対象の数式モデルにとらわれず対象の入出力から、ニューラルネットワークを用いた表現を求めて制御を行う手法とか、適応ループにニューラルネットワークを用いて収束性を確保するといったことが研究されている。又、ファジイ理論による制御系の調整・適応も考えられている。

DSP に代表される信号処理デバイスは膨大な積和演算を高速に行えるので、電流ループのように 100 μ sec 程の高速応答を有する系の制御が可能となっている。交流電動機のように 3 相 2 相変換を伴う系でも容易にソフトウェアによって制御できる。さらに適応・同定機能を実現するアルゴリズムの実装が可能である。インテリジェント化の最大のネックである実時間性は現在モーションコントロール特に電動機制御では解決されつつあり、自己診断機能等を有したチューニングレスの系が実用期を迎えつつある¹⁷⁾。

いずれにしろ、現在かなりの数の研究者がこれらの仕事に従事しているが、大きなブレイクスルーはいまだ得られていない。

要求されるモーションが複雑になってきているので、動作の計画部分、外界との情報、エネルギーのやりとりがある部分ではインテリジェント化が重要で (おそらくニューラルのような表現による設計が必要なのでは)、アクチュエータに関係しているところではいわゆるモーション・コントロール (ロバスト性が重要で、その実現に DSP 等を用いてローカルな意味でのインテリジェント化である適応・同定機能も含む) が使われるものと思われる。

ファジイの利用¹⁸⁾

ファジイはメンバーシップ関数を用いることにより人

司の知識のように曖昧さを伴うものを数値化できる。定性的な表現である知識を数値化して計算機のみで演算を施し機械システムに対する指令値を作ることができる。特に、外界とのインタラクションの存在する系、たとえばマニピュレータの制御等では有効である¹⁹⁾。

ニューラルネットワークの利用^{20), 21)}

ニューラルネットワーク、特に階層型ニューラルネットワークは強力な学習機能を有することで知られている。これはバックパゲーションと呼ばれるもので誤差が出力側から入力側へ伝搬するにつれ各細胞（ニューロン）の結合係数を変更されていくものである。大変簡単なアイデアでありながらその影響は大きく、現在のニューラルネットワークの研究の多くのものがこのバックプロパゲーションの応用である。VLSI によるニューラルネットワークアルゴリズムのハードウェア化が期待できるので多くの研究者が応用を前提に研究を進めている。

しかし、強力な学習能力は持つが基本的には静的非線形写像にすぎないのでパターン認識等の分離問題には向いているが、制御の問題には向いていないようである。制御は微分方程式で記述されるダイナミカルシステムを扱うので時間軸が存在してニューラルの構造でそれを記述するのは難しい。リカレント（再帰型）にするなどいくつかの方法が考えられるが今のところ有効な方法は見いだされていない。

図7にロボットのビジュアルサーボにニューラルネットワークを用いた例を示す²²⁾。動特性が問題にならない範囲で逆運動学を解くのにニューラルネットワークを用いてあり、目標物体に対していつも同じ位置・姿勢を維持するように動かすことができる。

最近では、遺伝子が世代間を伝搬するのを模した遺伝

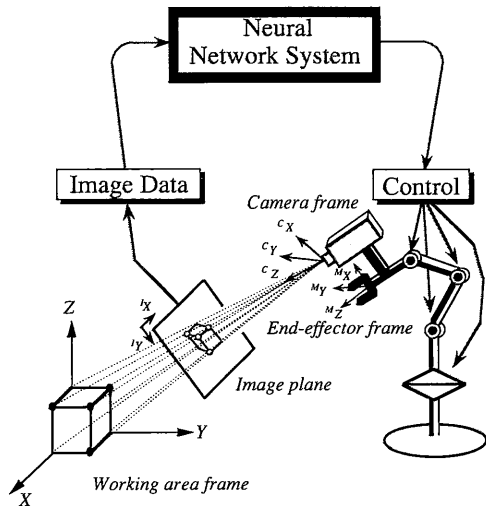


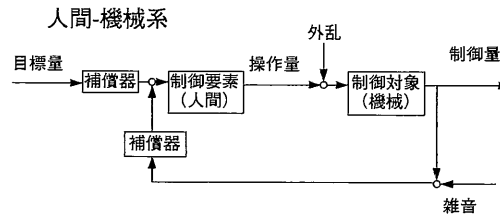
図7 ニューラルネットワークを用いたビジュアルサーボ

子アルゴリズムが注目を浴びており、ローカルミニマムのない効率的な最適化を期待できる²³⁾。

6. インテリジェント・モーション・コントロール

本稿の表題は「インテリジェント・モーション・コントロール」であり、当然インテリジェントを中心に記述すべきであろう。しかし、モーション・コントロールとの関係から考えると上に示したインテリジェント化が現在進められているものである。本章ではインテリジェント・モーション・コントロールの新しい研究の方向を示す²⁴⁾。

図8に従来から考えられている人間-機械系のブロック線図を示す。自動車の運転を考えれば想像できるように人間が制御要素としてループの中に入る。この時、制御系の応答時間（車だと sec のオーダー）で応答せねばならず負担が大きい。また、物理的にもシステムの一部として組み込まれるので自由度等が制限される。一方、ヒューマン・マシン・インターフェースを有効に用いると図9に示すように人間は信号レベル、物理レベルにおいて制御ループから分離される。その結果、人間は制御系の時間オーダーと異なる人間固有の時間オーダーにより対処でき、物理的にも制約がなくなり自然な形で制御ループと協調できる。これを実現するには制御系そのものが



人間が制御ループの一部になっている
→ 負担が大きい

図8 従来の人間-機械系

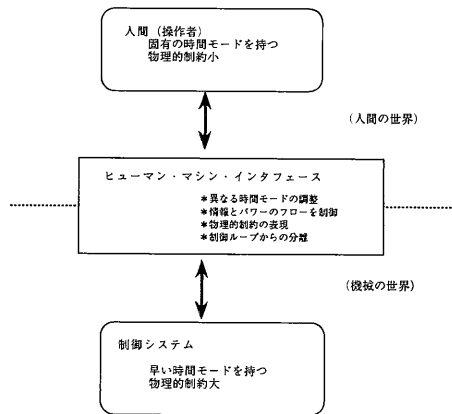


図9 ヒューマン・マシン・インターフェースによる制御システム

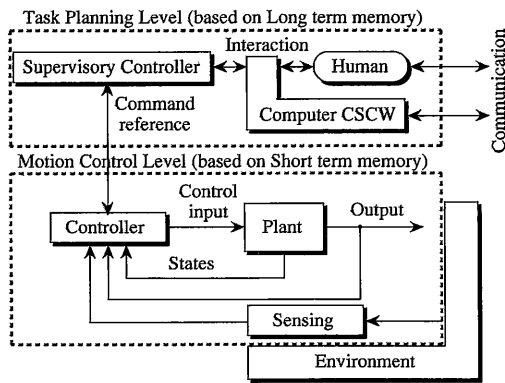


図10 階層化された制御系

ローカルにインテリジェント化し下位レベルであるモーション・コントロールは指示どおりに動作することが要求される。図10に階層化された制御系の構成を示す。このようにヒューマン・マシン・インターフェースを積極的に利用し、さらにビジュアルライゼーションとしての人工現実感技術を用いて人間作業を支援しようとするのが知的作業支援システム (IAS-Intelligent Assisting System)^{25), 26)}である。

7. 課 題

各制御系には当然いくつもの課題があるが、すべてに共通している課題として制御対象のモデリングの問題がある。非線形制御系である可変構造系とニューラルネットワーク、ファジイを除くと、線形系に対する線形制御理論の適用である。制御系設計を行うためには線形なモデルを最初に仮定せざるを得ない。ほとんどのアプローチは、ノミナルな線形モデルとモデル化できなかった部分に分けて考えている。あるいは、積極的に非線形な部分をすべて外乱 (等価外乱) として処理を行っている。モーションコントロールの対象が連続的な存在であってジャンプ現象がなく動作点近傍でほぼ線形であるという前提を受け入れれば、近傍を限定し動作点ごとにモデルを更新して行けば良いと思われる。しかし、推定して取り除く外乱も抑圧する外乱も制御対象の状態に依存するので何らかの伝達特性を持つ。理論的には安定性に疑問が残る。非線形理論による安定性の保証が望まれる。可変構造系では、ハイゲインによる線形化を前提にしているのでこの問題はないが、現実的な適用範囲に関する問題が残っている。インテリジェント化は現在の大きな研究課題であり、近い内に大きなブレイクスルーが実現されることを期待したい。(1992年9月28日受理)

参 考 文 献

1) 木村:「制御系設計理論の最近の進歩」計測と制御 vol.

31 No.1 pp. 78-84, (1992)
 2) 河村:「制御方式の新しい潮流」電気学会論文誌 112-D, pp. 97-99 (1992)
 3) 日本機械学会講習会—モーション・コントロールの基礎と事例 1992年2月
 4) 竹垣, 石岡: 知的制御システム, 海文堂, (1990)
 5) ミニ特集: ロバスト制御— H_{∞} 制御を中心にして, 計測と制御 Vol. 29 No. 2 (1990)
 6) 富塚:「適応制御の現状と将来」計測と制御 vol. 31 No. 1 pp. 122-124 (1992)
 7) 土谷:「予見制御の理論」日本機械学会誌 vol. 93 No. 856 pp. 192-197 (1990)
 8) 橋本, 畔柳, 原島:「DSPを用いたサーボシステムの予測制御—位置サーボ系による軌道追従実験」電気学会論文誌 Vol. 110-D No. 9 pp. 990-996 (1990)
 9) 大西:「メカトロニクスにおける新しいサーボ技術」電気学会論文誌 107-D, pp. 83-86 (1987)
 10) 堀:「加速度制御形サーボ系」電気学会論文誌 108-D, pp. 672-677 (1988)
 11) 金子, 梅野, 堀:「2自由度ロバストサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御」日本ロボット学会誌 Vol. 9 No. 7 pp. 28-38 (1991)
 12) 橋本, 原島:「VSS制御によるデジタルサーボ」日本ロボット学会誌 Vol. 7 No. 3 pp. 231-236 (1989)
 13) 原島, 橋本:「Sliding Mode とその応用-1,11」システムと制御, Vol. 29, No. 2, pp. 94-103 and No. 4, pp. 242-250, (1985)
 14) 鹿兒島, 木邑, 大寺, 福島:「VSS制御用 LSI の開発」計測自動制御学会第31回学術講演会 pp. 553, (1992)
 15) 中野, 井上, 山本, 原:「繰り返し制御」計測計測自動制御学会 (1989)
 16) A. Isidori: Nonlinear Control Systems An Introduction 2nd Edition, Springer-Verlag, 1989
 17) 松井:「DSP のモータ制御への応用」電気学会雑誌 Vol. 111 No. 12 pp. 975-979 (1991)
 18) 菅野: ファジイ制御, 日刊工業新聞社, (1988)
 19) 許, 橋本, 沈, 原島:「ファジイ補償を用いたロボットアームの位置/力の加速度分布制御」日本ロボット学会誌 Vol. 9, No. 3, pp. 276-286, (1991)
 20) 北村:「ニューラルネットワーク応用の現状と展望—計測制御の立場から」システム/制御/情報 Vol. 35, No. 1, pp. 2-10, (1991)
 21) 中野編:「ニューロコンピュータの基礎」コロナ社 (1990)
 22) H. Hashimoto, T. Kobota, M. Kudou and F. Harashima, "Self-Organizing Visual Servo System Based on Neural Networks", IEEE Control Systems, pp. 31-36, April, 1992
 23) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, (1989)
 24) 橋本:「ヒューマン・インターフェース—制御システムにおける人間の関わり—」生産研究別冊 “工学の変容” pp. 44-51, 1992年6月
 25) 橋本:「人工現実感とロボット—知能化作業支援システムの提案—」日本ロボット学会誌 Vol. 10, No. 7, (1992)
 26) 橋本, プス:「知能化作業支援システム」生産研究 Vol. 44, No. 12, (1992)