

## メカトロニクス系の研究開発\*

小森谷 清\*\* 館 暲\*\*

**Key words:** research and development, mechanics, electronics, mechatronics.

## 1. はじめに

機械の歴史は、人間の手作業の代行など人間が必要とした機能を実現するための装置の開発の歴史とみなすことができる。当初、リンク、歯車、滑車などの機械要素の簡単な組合せから始まった機械はしだいに複雑化し、単なる機械的な仕事をするにとどまらず、より高度な知的機能をも持つまでに発達してきている。

このように広義にとらえた機械の機能を分類すると大きく三つに分けられよう。

- ① 機械本来の機能： 狭義の機械といえるもので、リンクや歯車などの機械要素を組み合わせて動力の発生や伝達を行い、外界に対して有効な機械的仕事をなす部分。
- ② 制御機能： 円心调速機や時計の運動を規定する各種脱進機などのように制御要素として用いられる部分。
- ③ 情報処理機能： バスカルが発明しその後改良された純機械式の卓上計算機や時計の針などのように情報を扱う部分。

ところが、②、③の機能は最終的な出力が機械的な形である必要は必ずしもなく、ここ30年内外で急速に発展してきたエレクトロニクスにしだいに置き換えられてきているのが現状である。

エレクトロニクスのハードウェアはよく知られているように真空管からトランジスタを経てIC、LSI、超LSIへと革新的な進歩をとげるとともに、電子計算機技術を高度に発展させた要因となっている。特に電子計算機はストアードプログラム方式による自在な情報処理を可能にし、本来人間に特有であった知能をも部分的に実現するまでに至っている。したがってその能力から、上記の②、③のエレクトロニクス化は必然であるともいえる。さらに人間がこれまで行っていた機械の操作などのような知(能)的な作業の代行をも図られており、無人化工場も夢ではなくなりつつある<sup>1)</sup>。

このような流れに呼応して数年前から機械系と電子系を結びつけ、一体として高度な機能を実現している機器

をメカニクスとエレクトロニクスを合わせてメカトロニクスと称する動きがある。この機電一体化ではエレクトロニクスの中心にマイクロプロセサを用いるものが主流となりつつあり、こうしたシステムの設計手法についてはすでに検討がなされている<sup>2)3)</sup>が、特にメカトロニクス機器の研究開発では各系の設計問題に加えて両者の特長を生かして全体をまとめるバランスのとれた設計が重要となる。このためには両者にどのような機能を与えるかという役割分担が基本であると思われる。しかし、この役割分担は機械系・電子系のもつ特徴をもとに多面的な考慮から決定しなければならず、難しい問題でこれまであまり取り上げられてはいない。本稿ではこの点に着目して両者の役割分担を中心にメカトロニクス系の研究にかかわる問題を2,3取り上げてみたい。

## 2. メカトロニクスとは

メカトロニクスの定義についてはいろいろある<sup>4)</sup>が、機械振興協会が行った「機械産業の施策に関する調査研究<sup>5)</sup>」によれば、メカトロニクスは以下の4つの類型に分類されている。

- i) 従来の高度のメカニズム製品にエレクトロニクスを用いた高度の制御機能が付加され、高性能または多機能の機械装置としてまとめられたもの。
- ii) メカニズムで構成されていた制御機構がエレクトロニクスで一部置き換えられ、メカニズムとエレクトロニクスがうまく共存しているもの。
- iii) 主として情報を扱っていたメカニズムが、エレクトロニクスでほぼ完全に置き換えられてしまったもの。
- iv) マイクロコンピュータ組込みの家電製品のように、エレクトロニクスは入ってはいるが、メカニズム自体は簡単なものや、情報機器、複写機のようにエレクトロニクス主導形の機器内でメカニズムが共存しているもの。

以上をメカトロニクスの定義と考えてもよいが、メカトロニクスを機電一体と考えたとき、機の部分が事実上なくなってしまったような類型iii)は特にメカトロニクスと見なさなくともよい感じがする。たとえば電卓や液晶表示をもったクォーツ時計などがこの分類に入るが、

\* 原稿受付 昭和58年8月11日。

\*\* 機械技術研究所(茨城県新治郡桜村並木1-2)

表1 メカトロニクス機器の実例

産業用機器	第1次産業	田植機, コンバイン
	第2次産業	CNC, DNC 工作機械 (旋盤, フライス盤, マシニングセンタ) 産業用ロボット (塗装, 溶接, 組立) 無人搬送車 (フォークリフト…)
	第3次産業	自動販売機, 両替機 電子タイプライタ, 複写機, ファクシミリ, 印刷機械 ゲーム機械 (電子式パチンコ) 人工臓器, 多自由度動力義手
民生用機器		VTR, カセットデッキ 電子カメラ 電子ミシン, 全自動洗濯機 電子制御ルームエアコン, 自動車の電子制御

メカトロニクスの範囲として考えたい。

このような機械とエレクトロニクスが組み合わせられて機能するものは、逆に言って純粋に機械のみで機能するものを見つけるのが難しいほど、今日すでに数多く存在する。メカトロニクスの例を表1に示す。その代表的なものは、生産部門はCNC, DNCと呼ばれる計算機制御の工作機械や産業用ロボット、民生機器では電子制御される自動車用エンジン、高度なメカニズムとエレクトロニクスがうまく組み合わせられたVTRや電子カメラ、電子ミシンなどであろう。

### 3. メカトロニクスの構成

メカトロニクスが実際にどのような構成となるかを考えるため、メカニズム的には長い歴史と広い普及で高度に完成し、しかも新しくエレクトロニクス系を加えて性能の向上が図られた自動車用ガソリンエンジンを例として示す。図1(a)は従来のもの、(b)は電子制御を取り入れたものの構造の一例である。

従来のエンジンでは制御に最も重要な燃料と空気の混合比の決定は機械式のキャブレターで行われている。すなわち、シリンダの吸入行程で発生する負圧によって流入する空気流はアクセルに連動して動くスロットルバルブで調整される。一方、ベンチュリ管では、この空気流によって生じる負圧をうまく利用して、管に開いたノズルから燃料を自動的に吸い出し空気流に混合する。このときの空燃比はほぼ最適に調整される。次に重要な点火時期の調整は、クランクシャフトの回転をチェーンや歯車列で取り出して基準とし、吸気圧を利用して進角操作を加えディストリビュータ内の接点をオン・オフして実現している。

一方、電子制御エンジンでは、スロットル開度を測るポジションセンサ、流入空気量を測るエアフローセンサ、負圧センサ、水温センサからなる状態計測用センサ群と、得られた情報に基づいて燃料の必要量を計算するマイクロコンピュータ、及び決定された量だけ燃料を吸気管内に噴射するインジェクタで構成される。電子式燃料噴射システムによって空燃比制御を行っている。また、電子式点火時間制御システムは、エンジン回転数と吸気管圧力の関数で表される点火

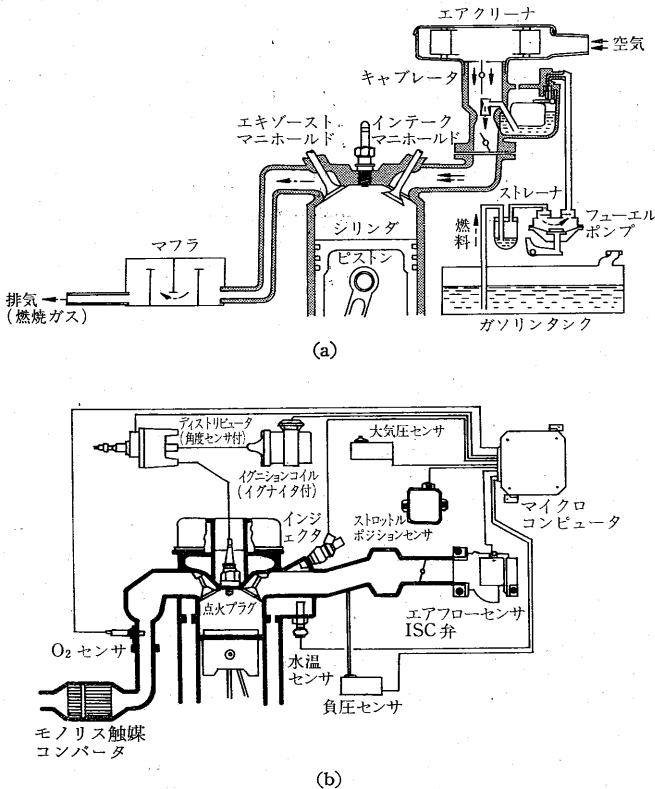


図1 自動車用ガソリンエンジンの制御

これらは本来①の機能をもたず、完全なエレクトロニクス化が有効な発展方向であったものである。したがって以下では①のみから構成されている機械に新たにエレクトロニクスが加わってこれまでになかった機能が付加され、大きな効果があがったもの、①に②ないし③が加わった機械の②、③の部分のエレクトロニクスに置き換えられ、高性能な機械装置としてまとまったものを

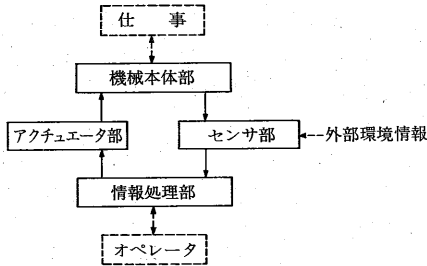


図2 メカトロニクス系の構成

時期をセンサ情報に基づいてマイクロコンピュータで算出しディストリビュータに出力することによって点火時期を最適に制御している。図2にメカトロニクス系の構成を示す。上記、電子制御燃料噴射システム、電子式点火制御システムでは燃料を燃焼して出力を発生するシリンダ、ピストン、クランクシャフトなど機械構造部分が機械本体部分に相当し、インジェクタ、点火プラグがアクチュエータに相当する。

このようにメカトロニクス系では、機械的に構成されていた制御・情報処理部分を切り離し、その機能を分解してセンサ、情報処理部、アクチュエータで置換しているところに特徴がある。特に情報処理部分にマイクロコンピュータを用いた結果、精密な制御が現実のものとなり、従来のエンジンでは困難であった省エネルギー化や排気ガス対策が出力性能を損なわずに達成されている。

このように情報、制御機能をエレクトロニクスで置換する利点は、多種の入力を選べる、入出力の関係を大胆に選択できるなど指摘されているが、その主要なものは設計の自由度の拡大であろう。

まず、機能要素に切り離して相互にケーブルで接続すればよいことから機械本体部の設計における空間的な自由度が高まったといえる。このことは機構の簡素化にも貢献し、信頼性をあげることに役立っている。

一方、エレクトロニクス系での利点はマイクロプロセッサの利用でその動作がプログラムによって決定されることである。すなわち、プログラムを作成することで自由な動作が潜在的に可能な点である。これには記憶装置の出現による時間的な拘束からの解放が大きく寄与している。

このようにエレクトロニクス化は機構、制御両者の設計に大きな柔軟性をもたらしたといえる。しかし、エレクトロニクス化を実際の状況の下で効率よく機能させるためには検討すべき点もいくつかあるのも事実である。以下にこのような問題を取り上げる。

#### 4. 機械系とエレクトロニクス系の役割分担

ここではマニピュレータ、多足歩行機械を中心にして

両者の役割分担を考えてみる。

マニピュレータは通常、多重リンク構造の一端を固定し、各関節部を協調的に駆動することで他端（手先）を自在に動かすようにした人工の腕である。一方、生物に固有な足機能を機械系で構成したものが多足歩行機械である。いずれの機構においても手先や足先を空間の所定のところに位置決めできなければならない。手の場合にはそれに加えて手先の姿勢の制御も必要になる。したがって手の場合は最低6の独立な自由度を持つようなリンク構造を作らねばならず、足では各足を独立に駆動して歩行しようとする各足に最低3自由度が必要となる。

実際の作業や歩行時に所定の位置にリンクの自由端を移動させるには、現在位置から目的位置までの軌道をつくり、その運動を実現する関節角を求め、それに従ってリンクを制御する方法がとられる。しかし、このように十分な自由度を機構的に与えてソフトウェアで運動を自由に制御するのは実用面からは必ずしもよい方法とはいえない。その理由には複雑なアルゴリズムの開発、演算処理時間の増大、ソフトウェアの信頼性の問題などが考えられる。そこで機構を工夫することでエレクトロニクス系の負担をへらす両者の適切な役割分担が重要となる。

たとえばマニピュレータの場合、産業用を想定すると作業空間での物品の取扱いに適した移動方向を基本的に持つものが障害物回避の能力が大きく人間に似かよった運動が期待できる多関節構造よりも動作精度、制御性など実用的な観点からは有利であろう。直交座標型、円筒座標型、極座標型マニピュレータは各々名前の示す座標系に沿った運動を基本としてもち<sup>7)</sup>、基本動作の組合せから作業を組み立てれば制御は非常に容易に実行可能である。実際、これらの型は産業用ロボットとして広い分野で使用されている。特に最近、組立作業に多く使用されはじめているSCARAロボットも作業に必要な運動に基づいて機構の構成を考慮した好例といえる<sup>8)</sup> (図3)。

多足歩行機械の研究としては4足<sup>9)</sup>、6足<sup>10)</sup>などの例がある。図4は6足歩行機械の例である<sup>11)</sup>。足の駆動機構は水平、垂直面で足を動かす二つの油圧シリンダと膝関節を駆動する油圧シリンダから構成されている。この構造では、不整地の歩行に際しては6足を協調制御しなければならない。しかも3次元直交座標系で与えられる足の接地点に対して各関節角を求める三角関数を含む複雑な演算が伴う。この場合も歩容に大きな自由度を許す代わりにソフトウェアに対する負荷が大きいいといえる。このような問題点と歩行機械に重要なエネルギー効率を高めることを目的に工夫された4足歩行機械の足の構造を図

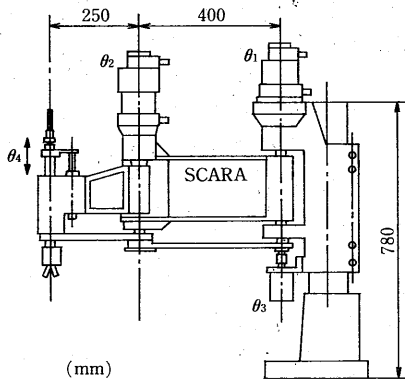


図3 SCARA ロボットの構造

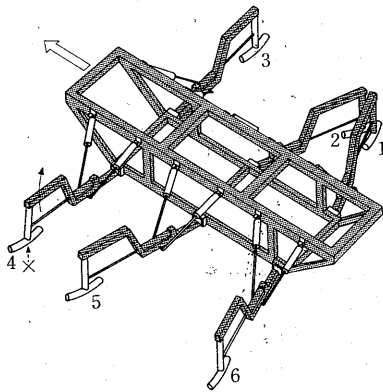


図4 6足歩行機械

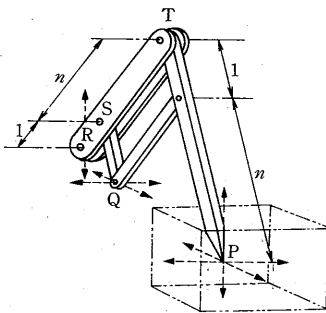


図5 直交座標形3自由度パンタグラフ機構 (PANTOMEC)

5に示す<sup>12)</sup>。3軸直交座標型パンタグラフ機構と名付けられたこの機構の特徴は図中のR点を固定し、Q点を水平面の直交する方向に駆動すると足先Pにはその動きが $(n+1)$ 倍され、Qを固定してRを上下方向に駆動するとその動きがPでは $n$ 倍される点にある。このような直交座標的な運動のため、座標変換がいらす歩行時の脚制御の演算処理が大幅に軽減されることになる。また、Rを固定することにより、自重を支持するに要するエネルギーを水平移動に消費するエネルギーと分離した形で歩行できる特徴をもつ。さらに多足歩行において歩

容を固定してよければリンク機構などで複数の足の運動を協調させ、アクチュエータ数を減らすとともに制御の簡素化を図り、2次元面の移動を達成することもできよう。

以上のように機械側の自由度を制限したり、うまく機構を設計することで、ソフトウェアによる制御負荷を減らし、機械系の特徴を生かすことも可能である。そのためにはメカトロニクス系の設計に際して、要求される機能を明確に把握し、いたずらにソフトウェアに汎用な制御を期待する機構とするのではなく、機械系、電気系の特徴を実用面でうまく生かす両者の役割分担が見直されるべきである。

### 5. メカニクス系とエレクトロニクス系の対抗

メカトロニクス系では機電両分野が独立に進歩する結果として進展するばかりではなく、一方の進歩が他分野の進歩を促し、互いに加速し合い、良い意味で競争関係を維持しつつ進歩していくとよく指摘されるところである。このような実例として前述したマニピュレータの研究の過程を振り返り、両者の対抗関係を見ることにしよう。

マニピュレータの誕生は、放射性物質を取り扱う目的でグリップなど把持具を空間の任意の位置に自由な姿勢をもたせるため、6自由度を持つ多関節腕の考案にさかのぼる。このような人間が制御しきれない多自由度の制御法としてはマスタスレーブ方式が採用された<sup>13)</sup>。すなわち、スレーブマニピュレータと同構造に自由度を配置したマスタマニピュレータを構成し、対応する各自由度をワイヤ、金属テープなどメカニカルな方法で一対一に接続する。オペレータはマスタを手で操作することによって同じ運動をスレーブ側で実現し、遠隔作業を行う。すべてがメカニカルに構成されたこのタイプでは、マスタスレーブ間隔の制約、大きな操作力が必要なことから、次に各自由度の駆動方式として電気サーボ式を採用し、メカニカルな結合を信号ケーブルに置き換え、これらの問題が解決された。これがマニピュレータにおけるメカトロニクス化のはじまりといえる。

ところがこの置換に伴ってメカニカルな方式ではもともと存在した力感覚のフィードバックが失われ、操作性の低下が問題とされる。そこでオペレータ側への力の伝達を可能にするパイラテラル方式が考案されることになる<sup>14)</sup>。

さらに複雑な演算処理を必要とする多自由度の協調制御は制御系に電子計算機を導入することではじめて可能になった。この時点からマニピュレータはマスタの運動をそのままならうばかりではなく、オペレータの動作指

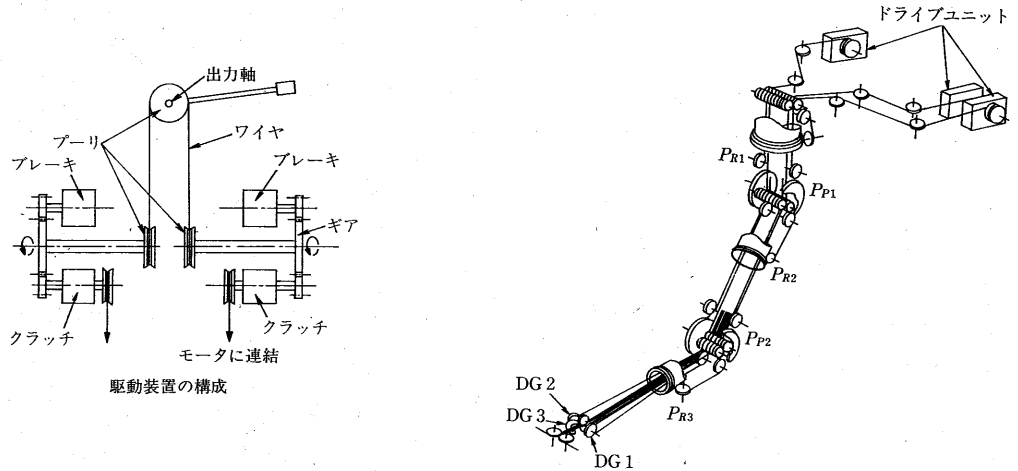


図6 粉体クラッチ及びワイヤ駆動マニピュレータ

令に従って運動できることになる。

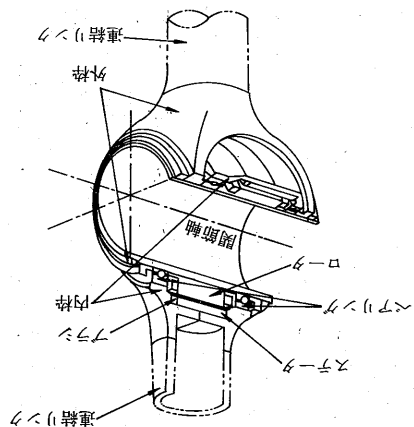
計算機の導入はマニピュレータ制御問題をソフトウェアのアルゴリズムの問題に変換し、以後多くの制御方法が提案されている<sup>13)~15)</sup>。マニピュレータの制御は、静的制御と動的制御に2分され、さらに前者はその目的から位置制御と力制御に分類される。位置制御では手先の位置に対して各関節角を決定する座標変換が問題となり、力制御では重力や摩擦力を補償しながら手先に要求される力ベクトルを発生するための各関節トルクの決定という座標変換問題となる。ただし、動作速度が大きくなり、各部の慣性力、コリオリ力による影響も無視できなくなると、精度よく制御するためにはそれらを考慮した運動方程式に基づく動的制御が必要となる。現在のところ各リンクについてこの運動方程式を実時間制御に必要と言われている10ms以内で解き、駆動トルクを決定する努力が進められ、4.5msに短縮したという報告もなされている<sup>16)</sup>。また、直接運動方程式を解かず、マニピュレータの簡単なモデルを構成し、制御系のゲインをモデルの応答に応じて適切に変更していくモデル規範型適応制御法も研究されている<sup>17)</sup>。

エレクトロニクス化はこうした高度な制御を可能とするが、実際にマニピュレータを精度よく制御するにはハードウェア的にも新しい改良が必要であった。位置制御の場合は、各関節の高精度な制御で十分であるが、力制御では各アクチュエータの力制御が可能であること、自重や摩擦力の影響の少ないことが要求される。図6にはこの種の試みの一例を示す<sup>18)</sup>。各関節の力制御はモータからの駆動機構に組み込まれた磁気粉体クラッチで行われている。この磁気粉体クラッチの原理は、入力軸と出力軸間に充てんされた磁性材料からなるパウダを外部か

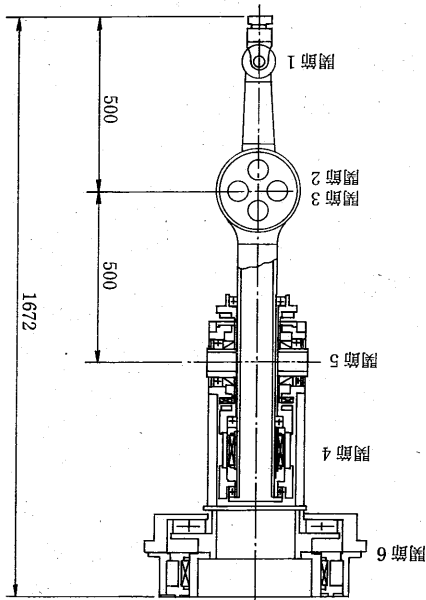
ら励磁して粉体相互の結合状態を変え、励磁コイルの印加電圧に比例したトルクを出力するものである。各自由度の駆動はこのクラッチを2個対向させ、ワイヤを介して拮抗的に行う。すべての自由度の駆動ユニットは肩部にまとめられ、腕本体を軽量化して運動性能の向上を図っている。

力制御から一歩進め、高速運動を実現する動的制御ではさらにハードウェアに工夫をこらさなければならない。高速運動には関節を直接駆動するのが有利であるが、その際、出力重量比の大きなアクチュエータを選択する必要がある。また、駆動系に起因するバックラッシュや摩擦も極力減らさなければならない。これに加えて手先側のモータが肩側のモータの負荷となるため、自由度配置についても検討を要する。この種の問題解決のため、自由度配置の最適設計を試み、各関節を希土類系磁石を含む高性能トルクモータで直接駆動するマニピュレータを図7に示す<sup>19)</sup>。腕の総重量は約130kg、手先の最大速度は4m/sで現存の電動マニピュレータで最速となっている。この例では手先の負荷重量が明らかにされていないが、ハードウェアの改良としてはさらにリンク部分を含んだ最適設計を行い、特にアクチュエータの出力特性と構造体の運動特性のマッチングを考慮することが重要である<sup>20)</sup>。現在、こうした高速マニピュレータに前述の運動方程式を考慮した制御手法が適用された報告はないが、両者の一体化が行われると両者に対する要求がまた一段と高まることになろう。アルゴリズム面の高速化を補うために複数のマイクロプロセッサを利用する並列演算処理が適用される可能性もある。この種の提案はすでになされている<sup>21)</sup>。

メカトロニクスとして、マニピュレータは特殊な例で



(a) 関節構造



(b) CMU腕の構造

図7 対ロボットライヴ・システム

ウエブも含めるとこの問題はさらに大きくなる。

このような問題への対応にはハードウェアを含めた機

能でのモジュール化技術と診断技術の開発が必要とな

る。エレクトロニクス系はモジュール化によって汎用

性を目指せば大きなメリットがあるのそのハードウ

ェアは標準化し、モジュール化を積極的に進めるべきであ

る。個別の装置への専用化はソフトウェアで対応すれば

よい。ただし、ソフトウェアも可能な限りモジュール化

し、専用ソフトウェアをその組合せで構成する構造化を

とっていかねばならない。

同じハードウェアでもメカニクス部分はモジュール化

していく。この問題に関しては要求条件に応じて考え方

をかえる必要があると思われる。すなわち、機能、寸法、

重量などに限界設計が期待される部分では機器に最適な

形への専用化、簡素化が必要であろう。特にそのような

期待が必要とされない部分については、機能ごとでモジ

ュール化し、複数の機器で共通化することが設計や故障

修復の労力を減らすことになる。このような機械のモジ

ュール化の例は示していくが、歯車減速機、直線駆動機

構などである。

こうしたモジュール化によって故障診断と修理は、モ

ジュールの入出力のチェック及びモジュールの交換とい

う手続きに簡素化可能である。これに、稼動状態での診

断を付加すれば、診断システムにましまろう。

はあるが、メカニクス、エレクトロニクスの双方の進歩

が他方への要求を高め、それがまたとにハイパーパ

ワされ、全体として性能、機能が高まる。一方が他の新

たな要求を満たす努力をおこたると全体の進歩が阻害さ

れる。このような意味で両者のバランスのとれた研究開

発が期待される。

### 6. 今後のメカトロニクス

高機能、高性能、高信頼、高経済性など一般機器への

要求とメカトロニクスの要求もおおむら一致してい

るわけであるが、特にその中でも今後は高信頼性に対す

る対応がしたいに重要になってくると思われる。なぜな

らば、高機能、高性能を実現してゆくために複雑化は避

けられず、全体の正常な動作を期待するには各要素の信

頼性を十分高めなければならないからである。この点に

ついては各要素技術の問題であるので、ここでは故障診

断といった観点から今後のメカトロニクスの方向を考え

る。

メカニクスから構成されていた従来の機械ではその故

障の予測は比較的容易で、いったん故障してもその修理

はメカトロニクス系に比べて楽であるといえる。それは、

故障前に異音を発したり、振動が大きくなるなど機械が

故障の徴候を示していたからである。

一方、エレクトロニクス系では、全体が一種のソフト

ウェアライズ化しており、その状態が目では見えないう

から故障の診断、その修理は難しくなる。さらにソフト

## 7. おわりに

人間に代わって作業を行う機械の一つの理想的な姿は人間そのものに近い形の機械であろう。ここではメカニズムにあたる手足とエレクトロニクスに相当する頭脳と神経系、及びインタフェースとしての感覚器が有機的に一体となって機能している。メカトロニクスについてもこのような両者の密接な結びつきが理想である。

本稿ではそれに至る過程で問題となる点を筆者なりに選択して考えを述べた。したがって、不十分な点が多いと思われるが、それに関しては参考文献を見ていただきたい。特に本特集では触れられていないが、センサとその技術もメカトロニクスでは極めて重要であることを指摘したい<sup>22)</sup>。

最近、注目を集めている新しい機能材料である形状記憶合金<sup>23)</sup>は、メカニズム+センサ+アクチュエータの機能を材料単体で実現するものでポストメカトロニクスにもあたるものであろう。今後、エレクトロニクス系のハードウェアの急速な進歩にならって、メカニクス系の近代化、ソフトウェアの高度化に力を注ぐとともに、このような新しい材料も有効に取り入れていく形でメカトロニクスの進歩を図ることが期待される。

## 謝 辞

本稿をまとめるに当たり、貴重な御意見をいただいた機械技術研究所谷和男主任研究官に謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 稲葉清右衛門: 最近のNCの進歩, 精密機械, 47, 10 (1981) 1185.
- 2) 加藤肇彦: マイクロコンピュータ応用システムの開発手順, 計測と制御, 19, 4 (1980) 26.
- 3) 加藤肇彦, 熊谷千尋: 機械制御へのマイクロコンピュータの応用, 精密機械, 47, 2 (1981) 244.

- 4) 梶谷 誠: メカトロニクス時代の設計の考え方, 機械設計, 27, 1 (1983) 26.
- 5) メカトロニクス化への課題, 機械設計, 23, 4 (1979) 23.
- 6) 井上喜太, 青木啓二: 高性能マイクロコンピュータによるエンジンの電子制御について, 自動車技術, 37, 2 (1983) 141.
- 7) 産業用ロボットの技術, 日刊工業新聞社 (1979).
- 8) 牧野 洋ほか: SCARAロボットの開発, 精密機械, 48, 3 (1982) 378.
- 9) 例えば, 田口金太郎ほか: 4足移動機械と歩行方法, バイオメカニズム2, 東大出版会 (1973) 154.
- 10) 例えば, R. B. McGhee et al.: Real-time Computer Control of a Hexapod Vehicle, Proc. 3rd ROMANSY Smp., Udine, Italy, (1978) 323.
- 11) M. H. Raibert and I. E. Sutherland: Machines that Walk, Sci. Amer., 248, 1, (1983) 32.
- 12) 広瀬茂男, 梅谷陽二: 歩行機械の脚形態と移動特性, バイオメカニズム5, 東大出版会 (1980) 242.
- 13) E. G. Johnsen and W. R. Corliss: Teleoperators and Human Augmentation, NASA, SP-5047, (1967).
- 14) 内山 勝: ロボットの運動制御, 応用物理, 51, 6 (1982) 666.
- 15) 新井健生, 中野栄二: ロボットマニピュレータの新しい制御, 計測と制御, 21, 12 (1982) 1095.
- 16) J. Y. S. Luh et al.: On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, Trans. ASME, DSM C, 102, (1980) 67.
- 17) S. Dubousky et al.: The Application of Model-referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators, Trans. ASME, DSMC, 101, (1979) 193.
- 18) 高瀬国克ほか: トルク制御機能をもつマニピュレータ, 電総研彙報, 37, 3 (1973).
- 19) H. Asada et al.: Design Concept of Direct-drive Manipulators Using Rare-earth DC Torque Motors, Proc. 11th ISIR, (1981) 629.
- 20) 高野政晴: ロボット運動の高速化技術, 計測と制御, 21, 12 (1982) 1122.
- 21) J. Y. S. Luh et al.: Multiprocessor-controllers for Mechanical Manipulators, Proc. IEEE Comp. Soc. 3rd Int. Computer Software Appl. Conf. (USA), (1979).
- 22) 尾崎省太郎: センサとセンサ技術, 自動化技術, 15, 6 (1983) 14.
- 23) 大塚和弘: 形状記憶合金, 応用物理, 51, 12 (1982) 1351.