

人間能力の補綴と医用精密工学*

館 障**

Key words: human rehabilitation engineering, cybernetic prostheses, artificial arms, artificial legs, extremity control, sensory prostheses, sensory substitution, medical robots.

1. はじめに

医学や医用工学は従来、言わば死ぬか生きるかの急性の内科的あるいは外科的疾患の診断や治療に重点をおいてきた。しかし、何百万という人が慢性の疾患を引きずりながら、あるいは不治の機能障害を背負って暮らしているのである。わが国における18歳以上の在宅の身体障害者の総数は、昭和55年2月現在で197万7千人と推定されるが、それに含まれない程度の機能障害や慢性疾患を持つ人の数はおびただしいものと推測される。これらは主に上肢、下肢といった骨格系の障害と、視覚・聴覚といった感覚系の障害であり、いわゆるリハビリテーションの分野とされていた。それは主にトレーニングによって残された運動能力や感覚機能を開発し、それらを巧みに生かして自立を促し社会復帰を図ろうとするものである。一方、第二次大戦後のサイバネティクスの興隆を一つの契機として、人間と機械を有機的に結合させて人間が失った運動機能や感覚機能を機械によって代替しようとする研究が進められている。これらの研究は、Human rehabilitation engineering と呼ばれ、最近の超LSI、半導体センサ、マイクロプロセッサといったエレクトロニクスの進展と相まって近年著しい発展を示している¹⁾。

一般に科学技術によって失われた人間能力をサポートすることを想定した場合、大別して2通りのアプローチが考えられる。すなわち、①人間が住んでいる環境を変化させて、機能障害を持っている人でも暮らしやすい住い作り、町作り、国作りを支援する方向と、②環境は現在のままであるとして、ともかく機械を高性能化し、機械と人との情報伝達手段を確立して人が失った機能を取りもどさせようとする方向である。①は、人の文明はそもそも自然を改造し自然の中に人工物を構築し、我々の暮らしが少しでも楽なものに快適なものになるように工夫して来た歴史であることを考えれば、そのような方向の次のステップとして障害のある人に暮らしやすい社会は当然、一般の人にとっても暮らしやすいわけで、社会の設備の一つ一つを最初の設計段階において障害者にも

利用できる形で考えていく、いわゆる normalization が重要な課題となってくるのが理解できる。卑近な例として、今度かわる新しいお札に点字をあらかじめ印刷時に付加する計画があげられる。このようなことは後から行おうとすると予算的にも大変な事業となるが、新券発行時に計画すれば初期の設備投資が若干増えるだけでその後の経費の増加はほとんどなく、それでいて障害者のうける恩恵ははかりしれない。こういった関係の工学は、広い意味でのシステム工学とか設計工学の範ちゅうに属すると思われるが、系統的理論的に取り扱われた例は少なく今後の重要な課題である。②は従来 Cybernetic prostheses と呼ばれている方向で、医用精密工学の重要な課題でもある。

本解説では、失ったり低下した人間能力や機能を精密で知能的な機械を巧妙に人と有機的に結びつけることによって回復させることを目的とした研究について、特に医用精密工学から興味深い研究にしばり、最近の話題と今後の方向を中心として概説する。

2. 人工の手足

機械の手足を設計するにあたり二つの立場がある。一つは、行いたい作業に適合した形で機械が最も効率よく働ける条件を考慮して設計し、ヒトの手足を参考にしてその機能を実現しようとはするが、外観やその動作挙動はヒトのそれとは異なるタイプの設計であり、例えば産業用ロボットの手や車輪式知能移動機械があげられる。もう一つの立場は、ヒトと全く同一の外観、動作、機能をねらう方式である。

失った上肢、下肢の機能を機械で補い、それらを自分の手足のごとく制御することを目標とする人間能力の補綴の立場からは、後者が望ましいことは言うまでもない。また、心理学的な立場からしても障害者の最も望んでいる点は自分自身が社会の一員としてアノニマスになれることであって、異様な形や奇妙な動き、異常音などは最も忌み嫌われるところである。このことは、いまでも外観のみを極めて精巧にまねた装飾義手が広く愛用されていることからもうかがわれる。後者の立場からの研究における課題は大きく分けて次の三つになり、それぞれ医用精密工学の重要なテーマであると思われる。

* 原稿受付 昭和57年1月28日。

** 機械技術研究所（茨城県新治郡桜村並木1-2）

(1) 外観、構造ともにヒトによく似たハードウェアを設計構成すること。これは、ヒトの上下肢の機能を実現し得る自由度配置の決定、小型・軽量かつ高性能のアクチュエータおよび動力源の開発、それらに適した材料の研究など多くの課題をかかえる。また実際上の極めて重要な問題として、ヒトに装着するインタフェース部分の設計があり、ヒトが違和感なく汗の不快感や逆に寒冷地における冷たさ

の問題などを解決するようなソケット、あるいはそれにかわる新しい装着法も望まれて久しい。なお、いままでに上記の立場から設計された全腕義手としては、例えば舟久保の手²⁾、機械技術研究所の全腕油圧義手³⁾、ユタ大学のユタアーム⁴⁾などがある。

- (2) ヒトの上下肢の動作を実現し得るような制御法を確立する。これは(1)の自由度配置やアクチュエータの種類や配置構成にも依存し、(1)と合わせた設計が最終的には必要である。しかし、ヒトの動作を分析しそれらを機械で実現するためのリンク機構制御の一般的な理論もあり得るわけで、現代制御理論などを応用したその方向の進展も大いに期待される。
- (3) 人間の意志を機械に伝達したり、あるいは機械の手足から情報をフィードバックする人間・機械間の情報伝達手段の研究。

以下、主に上肢を中心として(3)の問題について最近の研究の流れを紹介する。

2.1 上肢補綴精密機械の制御

機械の腕をヒトの意のままに制御することを考える時、①ヒトの中枢神経系における指令を直接外に取り出す、②運動神経系を通る信号を取り出す、③運動神経系のインパルスが筋肉に達して発生する筋の活動電位をひき出すといった3種類の方法が可能であるが、現在は③に関する研究が主流を占めている。

図1に一般的な義手の制御システムを示す。ヒトの手を動かしたいという意志が中枢神経系からの命令として、 α, γ の遠心性神経を経て筋肉のファイバーに達する。また、筋肉のスピンドルや腕のゴルジ組織で得られた位置、速度、力の情報は、求心性神経を経て脊椎レベルないしは高次のレベルにまでフィードバックされる。腕を切断することによりこれらの神経も切断されてしまうわけである。腕の切断された部位を義手で補った場合の義手の制御を考えてみると、理想的には図中の点線に示す

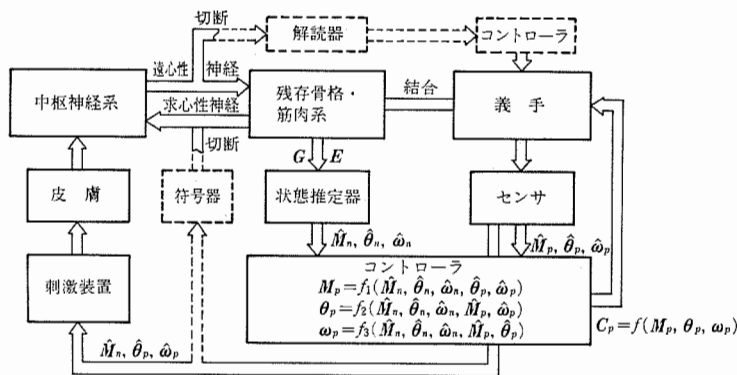


図1 義手の制御システム

ように切断された遠心性神経の切断端をすべて集めて、そのコーディングを解読し、その結果に基づいて義手の制御を行う一方、義手の実際の動きをセンサでとらえて、それにヒトの体で行っているのと同一の符号化を施し、やはり切断された求心性神経の断端に結んでやればよいことが理解できる。

しかし、現実にはそのような手術もできないし、また神経インパルスの解読や符号化についても未解決であるため、それにかわる手段が求められているのが現状である。中枢神経系の意志を音声を介して伝えたり、健全な手足の部位や舌を動かしてスイッチを操作する方式もあり実用上の効果を上げているが、ここでは、もう少しヒトの自然の動作に近づくことを目的として筋電を利用する方式について考えてみよう。

実用上最も成功しているのはオットーボックの手やワイムハンドなどで利用されている方式で⁵⁾、手先の屈曲運動に伴う筋電を前腕の拮抗筋上でとらえて、それらを手先の開閉にあてるという方式で、真の意味では自然ではないものの対応関係がつかみやすく、使用しているうちに自然なものになりやすいと言われている。しかし、この方式では自由度が増えると、対応部位が割り当てられず使用できない。Almströmら⁶⁾は、手先の制御に関して図2に示すような切断者に存在する幻肢の感覚を利用する方式を提案した。すなわち、多数の組(この場合は6組)の電極を切断端の適当な部位につけると、図に示すような6種類の異なった幻肢の手先の運動に対応して異なった筋電パターンが生じる事実を利用して、この6つのパターンをパターン認識の方法を利用して分離し、それぞれの命令パターンに応じて義手を制御する方式を臨床的に試み成果をあげている。これは、手先の動作のかなりの部分が前腕にある筋とそれにつながった腕とで行われているため、前腕の筋電に手先の動きに関する大部分の情報が含まれていることによる。

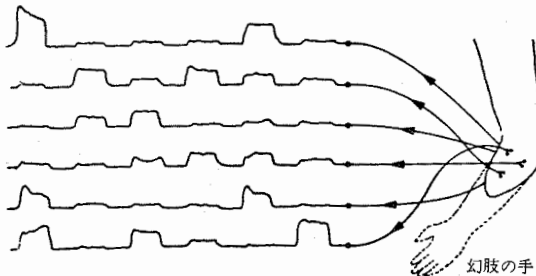


図2 幻肢の手の運動に伴う筋電パターン

しかし、全腕の義手になると手先とは異なり、実際に得られる情報は極めて少なくなってくるので同一の方法は利用できない。Simpsonは上肢の位置決めを行う時には上肢と鎖骨とは協調的に動き、上肢は鎖骨の延長としてとらえることが出来ることに着目し、鎖骨の動きを肩関節を中心とした極座標方向に沿って手先部を動かす動きに連動させた。この方式はサリドマイド児用空気圧式義手に応用され効果をあげた⁷⁾。機械技術研究所では、肩の上下、前後、左右への動きを大胸筋、僧帽筋、広背筋、大円筋などの筋電位からとらえ、それらに対応して、手先位置を上下、前後、左右に動かす方式を提案し、現在筋電から肩の動きを適確に推定する方式を検討している⁸⁾。

上記の2方式は、手先の開閉の制御で成功している動作の置きかえ方式を全腕に拡張しようとする考えであるが、それを更に進ませ Almström が手先について成功した幻肢感覚を全腕義手にまで適用することはできないであろうか。図1に戻って考える。残存骨格・筋肉系から姿勢情報 G を例えばゴニオメータなどの測定で得、また筋電の情報 E から内部の力の状態に関する情報を得、残存骨格筋肉系の状態(各関節に働く力 M_n 、角度 θ_n 、角速度 ω_n)を実時間で推定する。その推定値と、義手の持つセンサから測定された義手の状態(各関節のトルク M_p 、関節角 θ_p 、角速度 ω_p)とを利用して、それらの関数として、次にあるべき義手の状態(M_p, θ_p, ω_p)を押し量する方法が考えられる。その場合制御量 C として M_p を出力すれば力制御、 θ_p を制御すれば位置制御、 ω_p を制御すれば速度制御となるし、一般にはそれらの関数としての複合量が出力されるパターン制御となる。また、義手の時々刻々の状態は残存感覚器、例えば皮膚感覚を利用して使用者にフィードバックされる。

このような方式を最初に試みたのは Jacobsen であり、現在もこの考え方に沿って意欲的に研究を進めている⁴⁾。図3にそのシステム構成を示す。切断者の残存筋肉上に経皮電極を貼り、その信号から \hat{M}_n を推定する。そのた

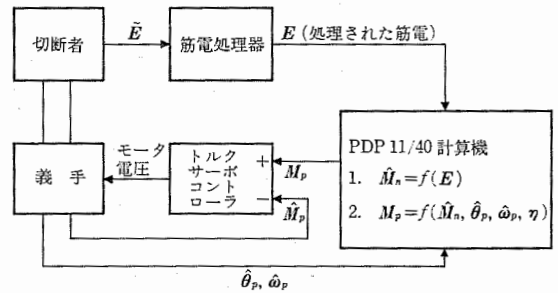


図3 Jacobsen の postulate 制御のブロック図

めには、 $\hat{M}_n = F(\theta_p, \omega_p)E + N(\theta_p, \omega_p)$ を仮定し、あらかじめ適当な計測器でトルク \hat{M}_n とそれに伴う筋電位 E を測定し、リッジ帰帰法を用いて F, N を求めておく。また、健常肢の挙動を観察すると、鎖骨の伸展・内展と腕の挙動との間には相関があり、例えば腕に関する作業において腕を前方へ伸ばすと鎖骨も前方へ移動することを利用して、 $\hat{\theta}_n = \eta \theta_p$ 、 $\hat{\omega}_n = \eta \omega_p$ という制約条件を仮定している。

上記条件のもとでは、 $M_p = f(\theta_p, \omega_p, \hat{M}_n, \eta)$ の形で既知量としての現在の義手の状態と筋電から求められた \hat{M}_n という入力量と拘束条件 η のもとの制御量 M_p が決定されるのである。なおこれは、 M_p を制御しているので力制御となっている。現在までに1自由度と3自由度の実験を行って本方式の有効性を示しているが、本来この方式は全腕義手において最も有効であるわけで、より高次のシステムへの進展が期待される。

また、これらの制御をより良いものにするためには、筋電位から力を実時間でしかも正確に推定する方法の開発が基礎的ながら極めて重要である。Hogan らは、多数の電極からの情報を最適に利用する推定方式を提案しており注目される⁹⁾。

2.2 下肢補綴精密機械

下肢は上肢に比べて意志による制御という観点からの取組みが遅れていた。それは一つには、片足切断の場合には棒を付けただけでも歩けるので別に大した制御もいらぬという考え方が支配的であったことによる。一方、両足切断の場合には逆に問題がむつかしすぎる。というのは、それを車椅子といった人間の通常形とは違った手段ではなく、人間の足と同等のもので補って解決しようとする二足歩行機械を作らなければならないことになる。しかし、その二足歩行機械は長年の努力と多数の優れた研究にもかかわらず、制御面ではやっと単純な平地歩行で静的な制御から動的な制御に移ろうとしているところであり¹⁰⁾、ハードウェアにおいても二足以外の巨大な油圧ユニットを必要として、数歩歩くと、すぐに油圧ホースがつかえるという状況にあり、補綴に利用す

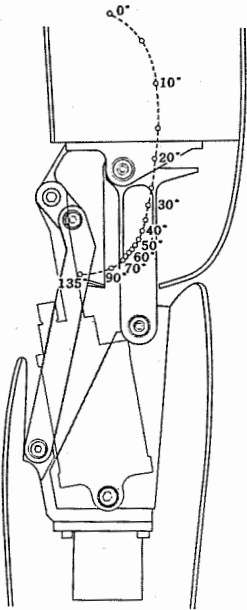


図4 UC-BL多回転中心機構を持つ人工膝

という段階には、いまだ遅いのである。もっとも最近二足歩行機械は現代制御理論適用の場として注目されており¹¹⁾、今後の進展は補綴という意味からも大いに期待される。

従って義足の制御という観点からの現在の研究の中心は片足の義足であり、それらを大別すると、動力を使わない受動的な巧みな機構を利用する方式と、能動的な制御を行って歩容パターンの改善や階段や坂道の昇降などの複雑な動作への対応を図ろうとする二つの流れがある。

前者の代表的な例としては、Radcliffeらの研究があげられる¹²⁾。図4に示すような多リンクによる膝機構を構成して膝の遊脚期制御と立脚時における膝折れ防止を図っている。この方式では、流体シリンダの制動係数は最適な一定の値をとっているが、これを積極的に制御して脚部に発生する制動力を変化させて遊脚期制御を行い歩行速度や歩行路の状況にあわせた歩行をねらった研究も進められている¹³⁾¹⁴⁾。

一方、アクティブな系を利用して通常の平地歩行での歩容の改善や、階段や坂道の登降を可能にしようとする研究がMITを中心として行われている。有限状態の意志認識装置を構成し、ヒトの各部の関節角度、トルク、筋電、フットスイッチの情報を意志認識装置の入力とする。その有限状態オートマトンの状態によって、平地歩行モードから階段の昇りのモード、坂道の登りのモードなどに切りかわる。更に、各モードの中に立脚期と遊脚

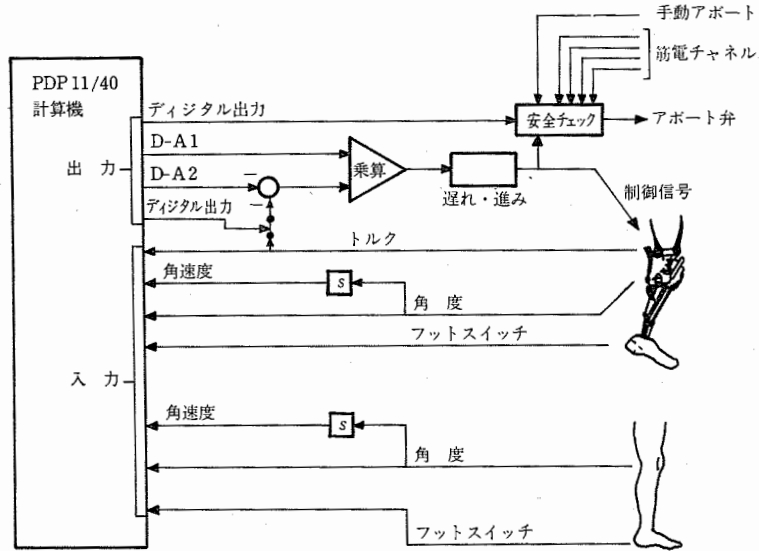


図5 ハイブリッド義足シミュレータ

期といった機能モードが含まれており、それらに応じて適切な能動モードや受動モードが出力される。その制御には図5に示すようなシステムが使われている。このシステムではミニコンピュータを制御要素とすることにより、義足のハードウェアは同一のものであっても、それを能動的なアクチュエータとして位置制御したり、ダッシュポットのような受動的な要素とみなしたり、かつそれらの特性パラメータを自由に变化させることができる。制御には立脚期においては、エコー制御を用い健全な足の動作をもとにして、それらを多少変化させて義足に与える方式を採用している。実際に2名の切断者に対して、平地歩行、階段の昇り、坂道の登りなどを被験者の動作から意志認識装置で自動的に切りかえ歩行する実験を行い良好な結果を得ている¹⁵⁾。

3. 人工の感覚器

人間にとって目や耳を失うということは手や足を失うのにも等しい不幸である。失った感覚を機械を人間に有機的な形で結合し補ってゆこうとする研究は感覚代行とか感覚補綴の研究と呼ばれている。この感覚代行システムにおいて最も重要な研究課題は、①外界の状況をいかに取り込むかといった計測の問題、②そのうちどのような情報を抽出するかといった信号処理の問題、③その抽出された情報をいかにコード化して、どのような経路を介して使用者に提示するのが最適であるのかといった人間・機械系設計の問題に分かれるが、それぞれ医用精密工学の課題でもある¹⁶⁾。

手や足の制御の場合と同様、このような感覚補綴にお

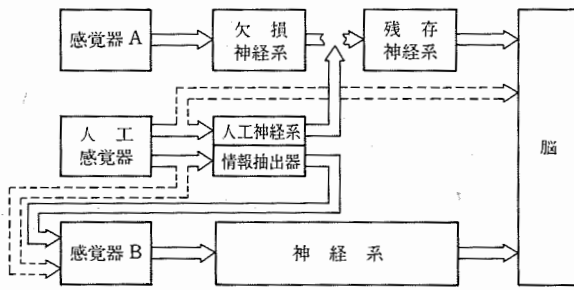


図6 感覚補綴システム

いて最も理想的なシステムは、図6に示すように目や耳と同等のセンサを構成し、人間が行っているのと同様の処理によって神経インパルスに変換し、それを残存の感覚神経系の末端に接続することであろう。

しかしながら、特に視覚においては損失神経系そのものが脳にも匹敵する情報処理を行っており、しかもそのプロセスの全貌はおろかその片鱗すらもしかとはつかめていないのが現状であり、それに代わる人工信号処理装置の構成は望めない。Brindleyら¹⁷⁾やDobelleら¹⁸⁾は、図6の点線で示すように人工感覚器としてのテレビカメラの出力をほぼそのままの形で脳に埋め込んだ電極上に提示する方式を試みたが、閃光現象をひきおこすことはできたが通常の意味での視覚現象を得ることはできなかった。

それに代わる考え方として、人工感覚器の情報から有効な情報を抽出して別の感覚器Bを介して伝える方法があり、Bとしては通常皮膚感覚が選ばれる。情報抽出器が必要となるのは視覚の処理する莫大な情報量に比して触覚の処理できる情報量は極めて限られているためである。このことから分かるように、この方法においても実は情報抽出器の設計に研究上のポイントがあるわけで、点線のような単純な変換のみで伝達を試みた従来の研究¹⁹⁾は、その方向を情報抽出器の設計の方向にかえつつあり、今後が期待される。

現在、最も実用上効果をあげているのは失われた感覚器の持っていた能力を典型的な基本的な機能に分離して、目的別、機能別に個別の装置によって問題を解決していこうとする、いわゆる機能分離型の研究である。視覚代行の問題に例をとるならば、読み書きといったコミュニケーションの問題と単独な自由行動といったモビリティの問題に分け、更に読取りの問題は印刷された文字、手書き文字、図や表などのパターンに対象を細分し、歩行補助の問題も、障害物検出、道案内を含む盲人の誘導、あるいは外界の状況をパターンとして把握する環境認識の問題などに分けて研究し、それぞれに適した装置を開発しており効果をあげている¹⁶⁾。

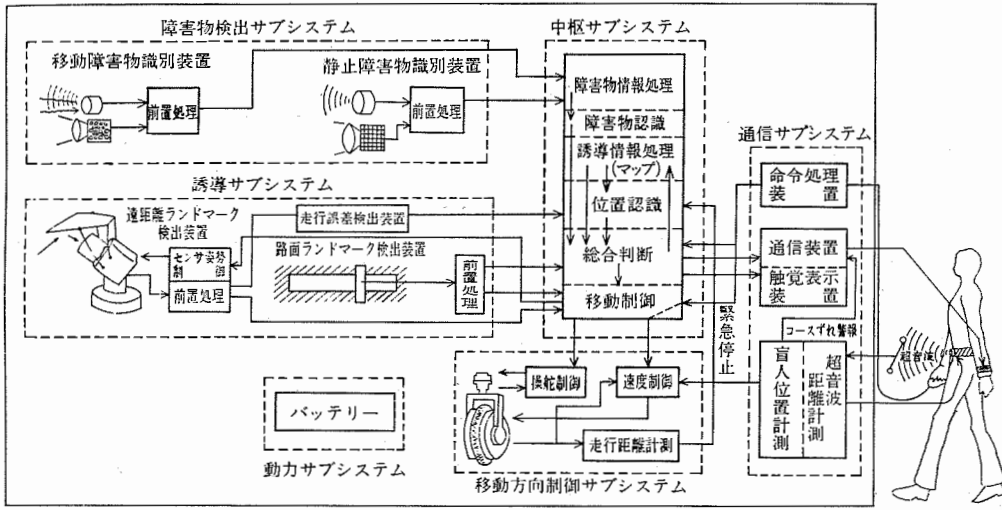
特にコミュニケーションにおいては、最新のマイクロプロセッサや半導体センサなどの著しい進展や、パターン認識理論の応用、また音声合成技術の進歩などと相まって飛躍的なイノベーションが起きている。その例は、文字を振動にかえて盲人に伝える TSI のオプタコン²⁰⁾や文字を読み取って単語単位で盲人に音声で伝えるカーズワイル読書器²¹⁾(現在ではゼロックス社の一部門)など枚挙にいとまない。

現在まだ未解決の部分が多く残している分野としては、盲人の歩行の補助の問題があげられる。この問題の解決のためには、① 次の一步の確保、② 方向付け、③ 道案内をも含むナビゲーションの三つの問題の解決が必要である。①については、Kayの超音波眼鏡²²⁾やレーザつえ²³⁾など種々の努力が重ねられていたが、①、②、③を総合的に行う研究についてはあまり例がなかった。

機械技術研究所では①から③の機能を総合した意味での盲人の歩行補助が盲導犬により行われていることから、盲導犬を一つのモデルとした歩行誘導機械の研究を行っている。現在のところ MARK III (図7)までの試作と、それらを用いた基礎実験が行われている。超音波距離測定により盲人の歩行の速度に合わせてロボットの速度を制御し、かつ盲人の方向づけを通信サブシステムで行う②の機能の確認²⁴⁾、マップを一種のオートマトンとして計算機内で表現し、ランドマークをランドマークセンサで適確に検出することにより、ロボット、したがって盲人を自由に(盲人の意思で動きたい時は盲人の命令どおりに、また自動経路探索を望めば自由な経路に沿って)誘導する③の機能の確認²⁵⁾、更には CCD カメラを用いた路肩の検出とその誘導への利用²⁶⁾などに成功している。なお、この際の機械から人間への情報伝達には、経皮電気刺激を利用しているが、ヒトの皮膚のインピーダンスが変化しても、加えるパルスのエネルギーが一定になるように制御し、それによる感覚強度が変化しないように工夫している²⁷⁾。

4. おわりに

機械の利用の思想には二つの方向があるように思える。一つは人間がいらないように、すべてを機械にやらせるようにと工夫してゆく自動化、無人化の方向である。もう一つは、機械と人間の結合を図り、機械を人間が自分の能力を補ったり、あるいは拡大するために利用しようとする人間能力の補綴と拡張の考え方である。不幸にして失った能力を機械を有効に利用し、それを自分の体の一部のごとく結合することにより補うサイバネティックな補綴は後者の代表的な例で、その研究の中心はおのず



盲導犬ロボット
図7 盲導犬ロボットのシステム構成

から人間と機械の通信と制御にある。そして、人間と機械の通信と制御はサイバネティクスの原点であり、かわることのない医用精密工学の重要課題なのである。

参考文献

- 1) R. W. Mann: Technology and Human Rehabilitation, Technology Rev., 81, 2, (1978) 2.
- 2) H. Funakubo, T. Yamagichi and Y. Saito: Japanese Research and Development of Portable Microcomputer System for Co-operative Control of Movement of Electrical Prosthesis, Int. Conf. Telemanipulators for the Physically Handicapped, Rocquencourt, (1978) 193.
- 3) M. Abe et al.: Development of Whole Arm Prosthesis (Prototype II), Int. Conf. Telemanipulators for the Physically Handicapped, Rocquencourt, (1978) 157.
- 4) R. B. Jerad and S. C. Jacobsen: Laboratory Evaluation of a Unified Theory for Simultaneous Multiple Axis Arm Control, Trans. ASME, J. Biomech. Engg., 102, (1980) 199.
- 5) I. Kato et al.: The Evaluation Method of Rehabilitation Devices; Field Testing of Powered Forearm Prosthesis, WIME Hand, Proc. 6th Int. Symp. External Control of Human Extremities, Dubrovnik, (1978) 141.
- 6) C. Almström and P. Herberts: Clinical Applications of a Multi-functional Hand Prosthesis, Proc. 5th Int. Symp. External Control of Human Extremities, Dubrovnik, (1975) 455.
- 7) D. C. Simpson: An Externally Powered Prosthesis for the Complete Arm, Proc. Inst. Mechanical Engg., 183-3 J, (1968-69) 11.
- 8) 谷和男ほか: 義手制御のための筋肉パターン識別学習, バイオメカニズム, 5 (1980) 88.
- 9) N. Hogan and R. W. Mann: Myoelectric Signal Processing; Optimal Estimation Applied to Electromyography-Part I and Part II, IEEE Trans. BME-27, 7, (1980) 382.
- 10) 加藤一郎: 静歩行から動歩行へ, 第20回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1981) 291.
- 11) 美多 勉ほか: 安定性回復機能をもつ2足歩行機械の制御, 第20回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1981) 287.
- 12) C. W. Radcliffe: A Biomedical Basis for the Design of Prosthetic Knee Mechanisms, J. Soc. Biomech., 4, Special Issue, (1980) 68.
- 13) I. Kato et al.: Development of Myoelectric Control System for an Above-knee Prosthesis, 2nd CISM-IFTToMM Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators, Warsaw, (1976).
- 14) W. C. Flowers et al.: A Microcomputer-controlled Knee Mechanism for A/K Prostheses, 3rd CISM-IFTToMM Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Italy, (1978).
- 15) D. L. Grimes: An Active Multi-mode Above-knee Prosthesis Controller, Ph. D. Thesis, Dept. Mechanical Engg., MIT, (1979).
- 16) 館 暉: 感覚補綴・代行システムの現状と将来, 計測と制御, 20, 12 (1981) 1113.
- 17) G. S. Brindley et al.: The Sensation Produced by Electrical Stimulation of the Visual Cortex, J. Physiol. (London), 196, (1968) 479.
- 18) W. H. Dobbie et al.: Phosphenes Produced by Electrical Stimulation of Visual Cortex, J. Physiol. (London), 243, (1974) 553.
- 19) P. Bach-y-Rita: Brain Mechanism in Sensory Substitution, Academic Press, New York, N. Y., (1972).
- 20) J. C. Bliss et al.: Optical-to-tactile Image Conversion for the Blind, IEEE Trans., MMS-11, (1970) 58.
- 21) G. L. Goodrich et al.: Kurzweil Reading Machine; A Partial Evaluation of its Optical Character Recognition Error Rate, J. Visual Impairment & Blindness, 73, (1979) 389.
- 22) L. Kay: Ultrasonic Spectacles for the Blind, Proc. Int. Conf. Sensory Devices for the Blind, St. Dunstons, London, (1966).
- 23) J. M. Benjamin, Jr. et al.: An Improved Laser Cane for the Blind, IEEE Int. Conf. Tech. Paper, (1974) 107.
- 24) 館 暉ほか: 人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方法, バイオメカニズム, 4 (1978) 279.
- 25) 館 暉ほか: ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法, バイオメカニズム, 5 (1980) 208.
- 26) 館 暉ほか: 視線可動型センサを用いる自律移動機械の誘導法, バイオメカニズム, 6 (1982).
- 27) S. Tachi et al.: Guide Dog Robot—Feasibility Experiments with MELDOG MARK III, Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots, Tokyo, (1981) 95.