



感覚補綴・代行システムの現状と将来

舘 暉*

1. はじめに

機械と人間の有機的な結合をはかり、失われた感覚が本来伝えるはずの情報を、残存感覚機能を巧みに利用して補い代行していこうとする研究の重要性とその可能性は、古くはウィーナーの著書サイバネティクスの中でも論議されている¹⁾。感覚補綴 (sensory prostheses) あるいは感覚代行 (sensory substitution) と呼ばれているこの種の試みは、第2次大戦後のサイバネティクスの興隆を契機として起ったといっても過言ではない。

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は、こうした一連の研究に新しい大きなインパクトを与えつつある。また、単に既存の理論や技術を応用するだけではなく、たとえば盲人の歩行の問題解決のために、どのような外界のパラメータをどのような形で提示することが歩行を可能にし最適化するかを実験的に解析し、それから歩行の理論といった新しい学問や技術体系を生み出していこうとする萌芽もみうけられる。

感覚のうち、最も研究が行われているのは視覚であり、聴覚、体性感覚・皮膚感覚がそれに続くが、臭覚や味覚に関しては感覚自体の研究は行われているものの感覚代行あるいは補綴としての研究は例をみない。

研究の方法論としては、I) 人間の眼や耳と同じように多数の機能を1つの装置で実現することをねらった直接型の研究と、II) 失われた感覚器のもっていた能力を典型的ないくつかの基本的な機能に分離して、¹⁹⁶⁷ 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機能分離型の研究とに分かれる。

前者の例としては、大脳の視覚領を直接電気刺激して生じる閃光現象を利用したり、あるいは皮膚を網膜の代用として外界の像をそのまま人の皮膚から伝達して人工眼を作ろうとする研究などがあげられる。一方

後者では、視覚代行の問題を、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とに分け、さらに読み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を対象を細分し、歩行補助の問題も、障害物検出、道案内も含む盲人の誘導、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いこうとしている。

本解説では、直接型の研究については、埋め込み型の電極を利用する方法と、皮膚を網膜の代用として利用しようとする試みとについて方法論別に紹介し、後者の機能分離型については、特に視覚を中心として、目的別、機能別に分類し解説する。

2. 直接型感覚補綴の研究

2.1 埋め込みによる方法

電気を盲人や聾者の視覚や聴覚を取りもどすために利用するという考えは古く、Benjamin Franklin が Royal Society of London に雷に関する実験を報告したときにさかのぼるとい²⁾。18世紀の後半には、Franklin, Volta, LeRoy らが外部電極を利用して実験を始めていた。

人間の脳の後頭部の有線野に電気刺激を与えると閃光 (phosphenes) を感じることは、1929年 Foerster により報告されている³⁾。この事実を利用して Brindley らは 1968年 盲人の被験者の右大脳半球後頭部の灰質に電極を接触させ直接的に電気刺激を行って視覚を補綴する試みとその結果を報告した⁴⁾。大脳皮質上に 80 個の電極が埋め込まれ、電気刺激は頭蓋骨と表皮の間に収められた受信器を介して外部から与えられる。実際には、全体の半分以下の電極しか作動しなかったが、それでも 4ないし 5の電極により生じるいくつかの簡単なパターンを盲人が識別しえた⁵⁾と報告されている。通常、閃光は刺激がなくなるとすぐ止むが、強い刺激が与えられると、場合によっては2分以内の影響が残る場合もあるという。

* 機械技術研究所

この実験に関して、当時このような閃光は生物学的に見て、長期的使用なども含めて安全なものであるのかという生物学的議論、また分解能は十分か、電極間の相互作用はないか、像は融合するのか、濃淡などの情報も伝達できるのか、また正常な視覚のような外界への像の再投影現象が生じるのかといった認識論的議論、さらには、そのような手術を盲人が受けたがるか、倫理的な問題はないかといった実際的な議論がわいた⁵⁾。

米国においても Dobelle を中心として同様の研究が行われている。1969年から4年間にわたって脳腫瘍などで手術を受けた晴眼の37人の患者に対して直接電気刺激の安全性の検討を行った後、1973年に一時的に電極を埋め込む実験を行ったという⁶⁾。その後、3mm間隔で配置された64個の1mm²プラチナ電極が長期的にボランティアの後頭部に埋め込まれ、現在までに20年人の経験が積み重ねられている(写真1)。

最近 Dobelle らによって行われていた、これらの一連の研究は、その研究場所を Utah 大学からニューヨーク市内にある Columbia-Presbyterian Medical Center に移した。Dobelle 自身は形式上は Utah 大学にも席をもつが、実験装置のすべては Columbia 大学のほうに移っており、Utah 大学では視覚補綴関係の研究は行われていない。1978年12月に6才で失明した63才のボランティアの盲人などに対する implantation の手術が行われるなど⁷⁾、閃光の研究がまったくやめになったわけではないものの、Dobelle 自身も最近では埋め込みに利用したのと同タイプの電極を利用した視覚代行のための経皮電気刺激の研究を NSF の予算で始めるなど、大きな路線の修正がみられる。

視覚の機序はきわめて複雑で、たとえば視神経の数は約100万といわれているが、それでも視細胞の数の約100分の1になっており、その変換からも複雑さの片鱗がうかがわれる。大脳皮質にいたるまでにきわめて多くの情報処理が行われていると推定されるが、その詳細はおろか概要もまったく不明に等しい。したがってその間の情報処理過程の解明を行い、外界の像から視神経インパルスへの情報処理に対応した変換を視覚代行装置の中で行ってから、その出力を大脳に提示する必要があるわけで、その間を短絡して大脳を直接刺激する方式にはあまり多くの期待がもてないのが現状であるように思われる。

一方、聴覚においてはその生理学的解明が視覚に比べ多少進んでいること、特に蝸牛内での基底膜の運動や有毛細胞のマイクロフォニック電位などの研究が比較的よくなされていることを反映して、蝸牛内に複数

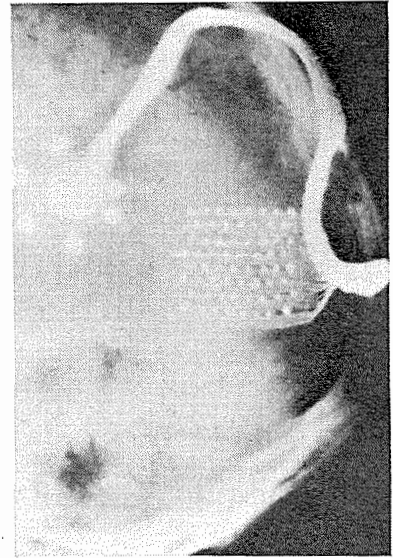


写真 1
Dobelle らによる大脳視覚領の直接電気刺激

個の微小電極を埋め込んで聴覚神経系を末端から刺激する multi-electrode cochlear prostheses といった聴覚補綴の研究が注目を集めている。

Hochmair-Desoyer らは、正円窓を介し鼓室階に22~25mm程度挿入する8チャンネルの Pt-Ir 製刺激電極を開発した⁸⁾。開発した多電極やディスク型単電極を聾のボランティアに実際に埋め込み音声の弁別実験を行ったところ、1~99の数字を単電極の刺激で訓練することなく、読唇を併用せずに38%の正解率で伝えられたという⁹⁾。現在、密閉シール型の埋め込み可能かつ汎用な8チャンネル電極に改良している。これにより、外部の可搬型音声情報処理装置を組合せることにより、どのような音声処理を行えば、最も良く音声情報を伝えるかが実験的に求めうるわけで、その方向での研究が進められている¹⁰⁾。

Eddington らは¹¹⁾、音声をどのような電気刺激パターンとして、聴覚神経(たとえば第Ⅷ神経)に伝えれば最適であるかを、基底膜にそった空間パターンと、それぞれの時間的なパターン変化のコーディングという立場から基礎的に研究する一方、実際にプラチナ製の5ないし6個の電極を4名の聾のボランティアに埋め込んで、計算機でパターンをコントロールしながら実際の刺激の効果に関する定量的な研究を進めている¹²⁾。

また、Stanford 大学のグループも、IC 技術を応用して埋め込み可能な微小電極を開発するとともに、バイポーラや CMOS キットあるいはカスタム CMOS チップなどを処理に用いるための条件などを検討している¹³⁾など、これからこの分野の進展が期待できる。

わが国においても、前述の人工内耳に関する研究が開始されはじめており、今後が期待される。また、中耳の伝音機構障害者のために信頼性の高い超小型補聴器を埋め込んで音声を内耳に直接機械的な振動として伝える、いわゆる人工中耳の研究開発も通産省の委託研究として進められている¹⁴⁾。

2.2 皮膚感覚を利用する方法

脳の柔軟性に富んだ適応性を前提として、皮膚を網膜の代用として利用して視覚補綴を実現しようとした Smith-Kettlewell Institute の TVSS (Tactile Vision Substitution System)¹⁵⁾ の研究もその方向をかえつつある。

Bach-y-Rita は研究所を去り、現在は Collins と Brabyn が研究を行っている。第 I 期の歯科用椅子の背に組み込んだ電磁式振動子、第 II 期のレチコンカメラと 32×32 の電気刺激素子からなる携帯用 TVSS においては、ほぼ外界の像と 1 対 1 の対応で像を人の皮膚上に提示していた。第 III 段階では、超音波のスクエナを利用して外界を探索し、その情報を腹部の皮膚上に距離と方向にわけて 2 次元的に (超音波断層像のように) 提示する装置に改良し実験を行った。

これらの実験結果は室内では良好であっても¹⁶⁾、戸外では利用できないことなどから、現在は SRI と共同で人工知能の手法を用いて風景を解釈し特徴を抽出し、その情報を提示する研究を提案し開始したところである。最初のベンチマークとしての装置はマイクロコンピュータを搭載した移動車を人の後から押しながら動かし、信号処理を行ってその結果を人に電気刺激を用いて提示する形になるという(注 1)。

3. 機能分離型感覚代行システムの研究

電極を体内に埋め込む、いわゆる埋め込み型感覚補綴は、生体と機械の整合性に関する十分の知見を必要とし、その完全実用化にはまだ多くの時間を要すると思われる。特にこのことは視覚において著しい。

一方、失われた感覚器のもっていた能力を典型的ないくつかの機能に分類し、目的別、機能別に工学的手段での補助を実現し、問題を解決していこうとする研究が感覚代行工学の分野で特に視覚を中心として盛んである¹⁸⁾。

視覚の機能を大別すれば、読み書きといったコミュニケーションと単独の自由行動を補助するモビリティ

とに分けられる。聴覚については主にコミュニケーション機能に重点がよせられているのが現状である。

3.1 コミュニケーション

点字は、フランス革命のとき、大砲の発火を指示するのに夜間声をたえず、ひそかに行うための方法として利用されていたものを、Louis Braille が改良し使い始めたといわれている。それは最近の電子計算機の進展期に至るまで、百数十年間ほとんど改良されずに利用されていた。1959 年になって MIT を中心として DOTSYS と呼ばれる計算機点字の研究が行われ、1968 年には、印刷用のテープをそのシステムで翻訳し、点字のプレスを行って実際の印刷本に 1 週間遅れで出版を行うに至ったという¹⁹⁾。MIT での当時の一連の研究のアイディアは、第二次大戦で失明し、後に感覚補助装置評価開発センター (SAEDC) の所長となった Dupress が 1960 年に始めた sensory aids discussion という昼食会に発している。Brailleboss というテレタイプと同様の構造で計算機からの出力あるいは自分の入力を、紙に打つかわりに点字として打ち出す装置は、SAEDC における試作と Perkins School での使用結果をもとにして、最終的には Draper Laboratory で製品化された²⁰⁾。Downing という盲目の MIT の学生は 1970 年 3 年生のときに、これで計算機を学び、卒業時には、この機械をもって計算機の会社に就職し現在も活躍しているという。

現在では、小さなピンを電歪素子を用いて押し上げて点字を多数同時に表示しうる製品が商品化され、たとえば Elinfa 社の携帯式点字レコーダや Telesensory Systems 社(TSI) のペーパーレスプレイル、さらには、40 字×2 列計 80 字を同時に表示できる Schönherr 社の BD 80 など数多くの優れた装置が利用できるようになっている。これらの装置を利用すれば点字でノートをとって、カセットに入れ、それを後で自由に引き出して点字で読めるのである。

わが国でも、通産省の医療福祉機器研究開発プロジェクトとして 1976 年から 1978 年にかけて、凸版印刷、日本タイプライタ、松下技研の三社が受託し、発泡点字印刷用インクや点字編集校正システムなどが開発されるなど²¹⁾、計算機工学での成果のテクノロジートランスファにより新たな展開がみられている。たとえば、OCR の原理で本を読み取り、それにもとづいて点訳を行って、点字出力を行う装置も米国で商品化されている。残された研究上の問題は、図、地図、写真といったパターン情報をいかにレリーフ状の印刷物に変換し伝達するかを解決することにあると思われる。この点に関しては、米沢らが熱発泡性マイクロカプセ

(注 1) この分野の研究に関しては、いままでも多くの紹介がなされているので (たとえば文献 17) 参照)、C. C. Collins からの私信 (1980) を中心として、最近の研究動向について紹介するにとどめた。

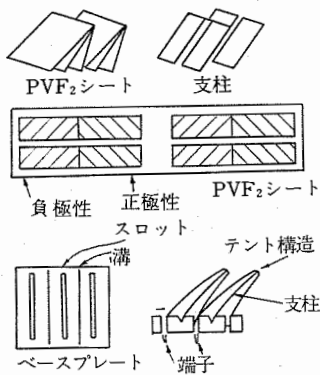


図1 Linvillのシート状ディスプレイのアイデア



写真2 Royal National Institute for the Blind における Kurzweil Reading Machine の評価実験

ルを用いたレリーフ像出力ファクシミルの研究を行っており注目される²²⁾。

点訳されていない普通の書籍や手紙を読みたいという要望はきわめて強い。これに答える方式には大きく分けて2通りある。1つは、本の文字を光学的に読み取って、その幾何学的形状に対応したコードに変換して、聴覚や触覚などの盲人の残存感覚機能を通して伝え、その文字の認識は人の能力にゆだねる方法である。それに対してもう1つの方法は、光学的に読み取った文字を機械が識別し、それを音声にして盲人に伝える方法である。前者に関しての歴史は古く、1920年の Optaphone²³⁾以来、Visotoner²⁴⁾、Stereotoner²⁵⁾、Lexiphone²⁶⁾、和気らの装置²⁷⁾など方式や形をかえて種々の工夫が繰返された。その中で最も商品化に成功したものは、LinvillとBlissが開発し実用化したTSIのOptaconで²⁸⁾、1978年で約5,000台の装置が全世界で利用されている。

その装置は、光学的にとらえた文字を単純な変換により、その文字と同一の触覚パターンとして伝えるもので、通常右手で口紅大のカメラを持ち本の上を操作する。文字を24×6のモノリシックシリコンの集積型フォトランジスタアレイでとらえ、それに対応させて24×6のバイモルフ型圧電素子を駆動して盲人の左手の指先に指示する。

現在、Linvillの司るStanford大学のIntegrated Circuits Laboratoryでは、従来のOptaconの刺激素子として使っていたPZFに変るものとして日本製のPVF₂などのピエゾポリマの研究を行っている²⁹⁾。この素材を用いて中心にピボットで自由に動く支柱をもつテント構造を作る。PVF₂のシートをかぶせて、そのシートの極性をテント状構造の両側で逆しておくことにより、PVF₂のシートの内側に電位を与えたときにテントの両側で膨張と収縮が起るようにする。このようなテント構造を用いて電圧を変えてシートの

膨張と収縮を同時に生じさせ支柱の上下運動を制御することができる。図1は、このシートの平面的な構成によりテントを複数個作成し、平面状にパターンを提示しうる構造を作ろうとするもので、パターン情報伝達のためのOptaconとして利用することを目的としているものと思われる。

この研究からもわかるように、Optaconの利用は将来的には文字からパターンに移る傾向をみせている。というのは、印刷文字に対してはすでにKurzweil Computer Products社からKurzweil Reading Machine (KRM)が製品として出され一応の成果をあげているからである。これは後者のタイプに属する装置でOCRにより文字を読み取り³⁰⁾、単語ごとに機械のメモリーにたくわえられた辞書と対照され、その発音規則によって単語単位で音声出力する。1980年6月現在で、米国のほぼ全州とカナダ、英国、オーストラリアあわせて200台以上の装置が図書館、リハビリテーションセンター、医療センター、学校などに設置されており、最高1分間250語の割合で、ほぼすべての活字を読みとるといふ(写真2)。

言葉は本来音で伝わるメディアであるわけで、読み取られた文字が音声に変換されて、単語単位で発音され情報伝達されることはきわめて自然で望ましい。カリキュレータの計算結果を音声で発話するスピーチプラスを先駆けて世に出したTSIであったが、この読書機ではKurzweilに一歩遅れをとった形になった。しかし、現在、それよりも良い製品を出す方向で全力をあげていると聞いている。またわが国でも製品科学研究所を中心として漢字かな混じり文を読む読書機の研究が進められている³¹⁾。したがって、今後の印刷文字伝達の方法は、これらの競争をとおして製品の性能が向上するに従って、自動読取り、音声出力の方式に大きく傾いていくものと思われる。

印刷文字以外の手書き文字や図・写真といったパタ

ーン情報の伝達が残された研究課題としてクローズアップされてきており、素子数の多い Optacon 形式の装置はきわめて有用であり、その方向での研究が今後ますますふえるであろう。

聴覚代行装置については、音楽を聞くということも考えられるにしても、最も重要な機能は音声を識別することであることは明白である³²⁾。これに関しても視覚と同様2つの方向がある。1つは、音声を触覚あるいは視覚情報に変換して聾者に提示し、その認識ないしは解釈は聾者にゆだねる方式であり、他は、機械によって音声認識を行ってその結果を、たとえば文字にして表示するものである。前者の例としては、吉本らの触覚ボコーダ³³⁾などがある。後者については、技術的には聾者用と限ることはない。通常の音声認識に関するおびただしい数の研究が世界各国で行われており、その成果のテクノロジートランスファで、たとえば、相手の話した内容を解読して文字でディスプレイし、タイプを打てば音声が行く聾者用電話などの出現するのも時間の問題であろう。

3.2 モビリティ

盲人の自由な単独行動への願望は大きい。それを可能にするための2つの因子として、orientation と mobility があげられる³⁴⁾。前者はある環境での自己と物の位置関係を認識し空間に位置づけることであり、後者は、人間が自力で空間の一点から他の一点に安全かつ効果的に移動する過程であるとされ、この2つは互いに密接に関連している。

Mann はこの単独行動の過程をつぎの3つの機能に分類してとらえている³⁵⁾。(1)つぎの1歩の確保、(2)方向づけ、(3)道案内を含むナビゲーション。(1)は、Dupress のいう「環境空間をつらぬく自分の体を通すことのできる大きさの障害物のない安全なトンネルを見つけ出す」という盲人歩行の基礎的なステップである。特に段差のような足もとの情報、また雨どいや木の小枝などの空間的な状況、前を歩く人や横ぎる車などの障害物を実時間でとらえていかねばならない。(2)は、環境と自己との位置づけであって、これがないと道なりに歩いたりすることはできない。(3)は、最も重要な要素であって、メンタルマップと呼ばれている頭の中に構成されている地図と、何らかの形で提示される誘導情報とから、自分の希望する場所に自力でたどりつくことを可能にする過程である。

(1)の過程を補助する最も基礎的な方法に白杖を使用する Hoover Technique³⁶⁾がある。これで検出しえない領域をも計測技術とエレクトロニクス技術を導入して検出可能にしていこうとする試みは、Craberg³⁶⁾

にさかのぼるといわれている。Benjamin³⁷⁾は、3つの GaAs レーザー (900 nm) を用いて 0.2 μs のパルスを上、前、下の3方向に毎秒 40 回発射し、その反射光を上方、前方、下方用の光学系で集光し、杖の中央にあるシリコンフォトダイオードで受光して、その反射光の強弱により障害物の有無を検出するレーザー杖を開発した。杖の先より約 1 m の場所の 15 cm 程度の段差が検出でき、杖より約 4 m 先の障害物の有無の状況が検出できるように設計されている。スウェーデン国防研究所 (FOA) でも³⁸⁾、レーザー素子を1つにしてグラスファイバを用いた同種の装置が開発されている。前者については、National Research Council の補綴研究開発委員会、後者については Uppsala 大学で評価実験が行われているが³⁹⁾、最も重要な点は、杖を動かすことにより、外界の探索領域が大きく変化するが、その変化する領域を自分のまわりの外界にいかに対応づけるかにあるといわれており、真に使いやすい装置にするためには手首の状態などを実時間で測定して、それによる座標変換などの信号処理も必要になってくると思われる。

このことは、超音波を前方に発射し、外界における障害物までの距離情報を音あるいは振動刺激の周波数に変換して盲人に使える手持ちの装置である Mowat Sensor⁴⁰⁾ や Nottingham Obstacle Detector⁴¹⁾ についてもいえる。後者の装置については、10 人の盲人の使用者にバイオフィードバックを用いて水平に保持する状態を教える訓練の結果が報告されている⁴²⁾。

補助装置開発当初における単に前方にある障害物を探知して警報を与える obstacle detector の考え方は、しだいに障害物のない進むべき空間を明らかにするという clear path indicator の概念に進展してきている。この考えは、前出の Dupress の独自の歩行法によるといわれ、その考えに基づいて首からかけて利用する Pathsounder が生まれた⁴³⁾。その原理は盲人の正面のドアの大きさの奥行き約 2 m のスペースに障害物があるかないかを超音波を利用して判定し、なんらかの危険があるときのみ音でそれを知らせるというものである。盲人にとって残存感覚機能、特に聴覚は最も重要な外界情報入力チャネルであり、何ごともないときには、装置から何も入力されず残存感覚機能に集中できるこの設計思想は重要である。

コウモリは、周波数変調された超音波パルスを発し、その反射音から自己と環境の関係をつかみ巧みに飛翔する。Kay は⁴⁴⁾、超音波の周波数を三角波上に 80 kHz から 45 kHz に変化させ、反射音と発信音の周波数差から、物体までの距離を求める巧妙な回路を

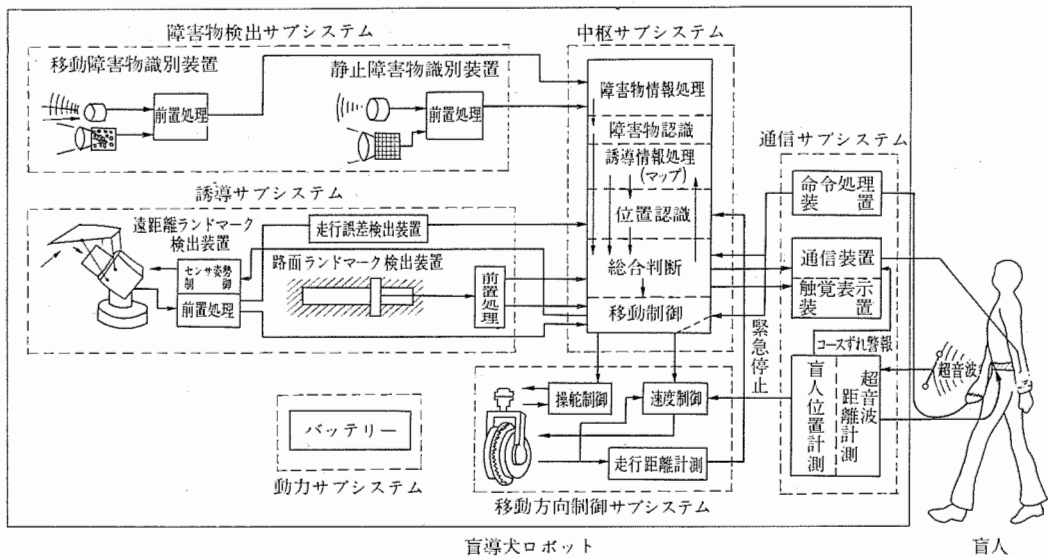


図 2 盲導犬ロボットのシステム構成

考案し、送受信素子を眼鏡にしこんだ超音波眼鏡を開発した。この SONICGUIDE と呼ばれる装置は反射面の違いを音色の差として提示し、障害物の場所を、左右の両耳にステレオの原理で表示する。また、距離の情報を音の高低として伝達しているなど、これにより、自己と環境との関係をおる程度つかむことができるため、Kay らは Environmental Sensor として区別している。現在世界で約 1,000 台利用されており月に 30~40 台は売れているという。この種の装置の問題点は、環境の状況を検出するセンサ出力の解釈がほとんど盲人にゆだねられている点であり、歩行に際して、常時注意を信号に集中しなければならない。したがって、残存感覚機能にのみ集中した際の効果と、この装置を利用したことにより採取情報量のふえたメリットと残存感覚機能への集中度がその分減るデメリットとの総合した効果を常に比較する必要がある。

わが国においては、現在通産省医療福祉技術開発委託制度のもとで、これらの盲人用補助器の開発が進められている。ねらいは国産化によりこれら補助器の低価格化、高性能化をはかることにある。前方 5m 程度の範囲で道路上の障害物を盲人が認知できるような小型、高性能かつ安価な盲人用歩行補助装置の開発であって、前方および上方用の超音波送受信器と、下方の凹部検出のための光学的検出器を有するものである。現在、東伸電機とサンクスによる 1 次試作が終了し、その第 1 次評価実験に入っており成果が期待されている。

(3) の道案内を含む盲人の誘導の問題については、

たとえば微弱電波とミニコンピュータを利用した自動車の総合管制技術⁴⁵⁾などのテクノロジートランスファとして盲人の道案内を行おうとする試みがあったが、環境への投資が多すぎることなどの理由から実現していない。常時は盲人や外国人あるいは町に不案内な人が利用していて、地震や火災などの災害時には一般用の避難補助用誘導システムとしても利用できるシステムに高めることにより実現されることが期待される。

地図を盲人が利用できれば、という願いに対する 1 つの解答がレリーフ状にプレスして作製された盲人用タクトイルマップであり、道順や、重要な目印をカセットテープに録音しておきそれを利用するといった試みもなされている。最近のマイクロプロセッサを利用することにより、より使いやすい音声出力装置を有する携帯用の地図も考えられている。

(1) から (3) の機能を総合した意味での盲人の歩行の補助は、介助者が一緒に同行するか、あるいは盲導犬により行われている。古来、イヌは人に代わって盲人を導くのに利用されていたが、本格的な訓練が始まったのは 20 世紀に入ってからであり比較的最近のことである。盲導犬は従来から使われている歩行補助手段のうちで、(1)~(3) の機能をそなえとともに、人間と犬との役割分担が合目的性をもってはっきりしており、最も優れたものの 1 つであるが、動物であるがゆえの固有のいくつかの欠点も有している。

機械技術研究所では、盲導犬を 1 つのモデルとした歩行誘導機械の研究を行っている。これは、前述の (1) から (3) の機能を機械で総合的に行うための基礎

研究でもある。図2に示すように、システムは階層構造をもつサブシステムからなり、基本的には(1)のつぎのステップの確保を障害物検出サブシステムで行う。(2)の方向づけを、ランドマークを用いたロボットと外界との絶対位置測定結果と、超音波距離測定による盲人のロボットに対する相対位置計測結果との総合判断により、通信サブシステムを介して行う。(3)の道案内については、誘導サブシステムがうけもち、路上に設置したランドマークとロボット内部に有するランドマークのつながり具合に関するマップとを利用して、指定された目的地まで自動的に盲人を誘導することができる。

現在のところ、MARK III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を介して行う(2)の機能の確認⁴⁶⁾、マップを一種のオートマTON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格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場合には盲人の命令どおりに、また自動経路探索を望めば、自由な径路にそって)誘導する(3)の機能の確認⁴⁷⁾、さらには、CCDカメラを用いた路肩の検出とその誘導への利用⁴⁸⁾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、人の皮膚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⁴⁹⁾。

4. 人間・機械・環境シミュレータ

感覚代行システムの設計において最も重要な研究上のポイントは、(i)外界の状況をいかに取り込むかといった計測の問題、(ii)そのうちのどのような情報を抽出するか、どのような情報がたとえば人の歩行(あるいは機械の自律的移動)を可能にするために必要かつ十分であるかを研究する情報処理の問題、(iii)その抽出された情報をいかにコード化して、どのような残存感覚機能を介して使用者に提示するのが最適であるかといった人間・機械系設計の問題の解決にある。

(i)に関しては、超音波素子、半導体レーザー、PSD、CCD、CIDなどの特性の優れた素子の開発とそれらの効果的な利用法といった巧みなアイデアに依存するところが大きい。最近の半導体センサの進展は、この分野の研究にとって明るい材料である。

(ii)の部分は、マイクロプロセッサによる信号処理

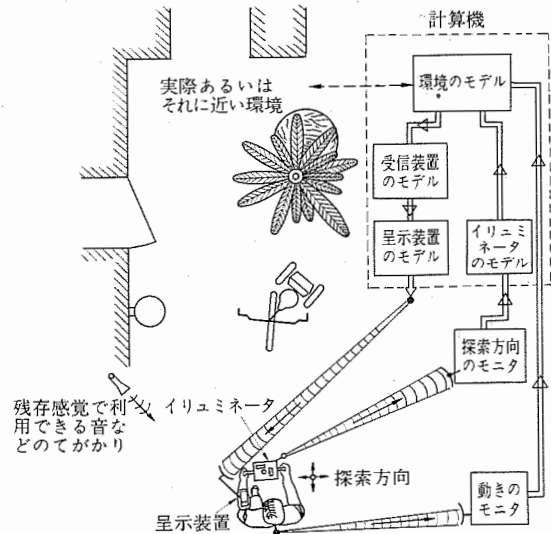


図3 人間・機械・環境シミュレータ

にあたる部分であるが、実はどのような情報がどのような用途に必要なかは、系統的には調べられていない。コミュニケーションについては、従来からの画像処理やパターン認識の手法や、音声情報処理の手法が応用でき、確実に成果をあげつつあるが、環境認識や歩行の問題に関しては、3次元物体認識や人工知能あるいはロボットといった研究と同時進行している状態であり、むしろ感覚代行システムの研究のほうから他分野に利用できる新しい手法なり処理法が生まれつつある。

(iii)の人間・機械インタフェースは最も重要な分野の1つであり、今までにも聴覚や触覚を中心として、その情報伝達に関する多くの系統的な研究が精神物理学的手法を用いて行われてきている⁵⁰⁾。しかし、これまでの研究は、どちらかという和被験者が、たとえば椅子に座ってじっとした状態での測定結果であり、歩行したり作業を行ったりしている場合の情報伝達に関する研究に関しては、最近その緒についた段階である。

Mannは従来の盲人用歩行補助装置の設計がその時代の研究者の思いつきから発しており、(ii)(iii)の基礎的かつ系統的な研究が欠けていたことへの反省から、人間・機械・環境シミュレータを用いる研究の重要性を1960年の半ばに指摘したが⁵¹⁾、実際の研究はNEIの予算によるEnhancement of Mobility for the Blindの研究の開始された1979年の秋まで待たねばならなかった⁵²⁾。

図3に示すように、実際あるいはそれにきわめて近い環境を各種補助装置を利用して自由に行動する盲人

の歩行パターンを実時間で計測し評価することにより(ii), (iii)の問題を系統的かつ定量的に評価をしようと試みている。外部の環境とその計算機内のモデルを利用して、被験者に実際の行動を起させ、そのとき使用している歩行補助装置の向きやそれからのデータ、さらには被験者の動きを実時間でとらえてそれを計算機内に取り込みながら、歩行補助装置からの情報(あるいはモデルから得られる情報)を計算機で処理し、外界のいかなるデータのどのようなパラメータを、どのような形で提示すれば被験者が盲人者に近い形で行動できるかを調べるのが、この研究の最終目標である。

その際に、各種の装置は実際に作製する必要はなく計算機でシミュレートして、一般的に最適、あるいは個人個人にもっとも適した形の装置を選択して、その後実際のハードウェアを開発すればよく、きわめて能率がよい。また、このシミュレータは、視覚代行装置や義肢用感覚代行装置などの系統的な設計法の確立に重要であるばかりでなく、すでに開発されている装置の定量的な評価にも役立つ。たとえば図3で、すでに開発されている装置を各種とりかえながら利用して、擬似環境内を歩行し、そのときの人の動きや障害物の検出状況を実時間で計測し、それらを通行時間や衝突回数、歩容といった評価基準から相互比較する方法などが考えられよう。

AFB(全米盲人財団)でもポラロイド社の超音波距離計とマイクロプロセッサを組合せて、障害物に関する種々の情報を音声出力も含む各種方式で出力できる装置(CTA: Computerized Travel Aid)を作製し、どのような情報をどのように出力するのが有効か、実際のフィールドテストを行いながら研究している⁵³⁾。さらには、Brabynらも同様の研究を始めるなど⁵⁴⁾、この種の基礎的な研究の進展が期待される。

5. おわりに

ウィーナーは、手を失うことは運動機能を失うだけでなく、それに伴う感覚機能も失うことであるといっている。体性感覚や義肢用の皮膚感覚や深部感覚の代行あるいは補綴も感覚代行の重要な分野であるが、本特集の動力義肢の解説と重複するので割愛した。

感覚代行システムの現状を2つの方法論に分けて最近の研究の流れを紹介してきたが、機能分離型では機械で割合簡単に実現しうる機能についての製品化が進み成果をあげる中で、その研究の中心は図や写真あるいは外界の状況といったパターンの処理に移りつつあり、パターン認識、画像処理、信号処理といった研究の進展と、それらの理論の効果的な応用に焦点があて

られつつある。また、一部の製品については国際的な規格化あるいは互換性の問題が真剣に考えられなければならない状況にきている。

一方、直接型は過去の外界の像を単純に人に提示する方式から、外界の状況の中の特徴を機械の側である程度抽出し処理して、その結果を提示するといった方式に進みつつある。人の感覚情報処理過程の生理学的、心理学的知見の利用や人工知能の研究成果などをとりいれようとしている。

また、単に既存の理論や技術を応用するだけでなく、たとえば盲人の歩行補助の問題のようにどのような外界のパラメータをどのように提示すれば歩行が可能となり、またそれが最適なものになるかを実験的に解析し、それから歩行の理論といった新しい学問や技術体系を生み出していこうとする動きの萌芽もみられ注目に値する。

(昭和56年9月17日受付)

参考文献

- 1) N. Wiener: Cybernetics, M. I. T. Press (1961)
- 2) W. Watson: An Account of Mr. Benjamin Franklin's Treatise, Lately Published, Intituled Experiments and Observations on Electricity, Philos. Trans. R. Soc. Lond., 47, 202/211 (1751~52)
- 3) O. Foerster: Beitrage zur Pathophysiologie der Sehbahn und der Sepsphäre, J. Psychol. Neurol. (Leipzig), 39, 463/485 (1929)
- 4) G. S. Brindley, et al.: The Sensation Produced by Electrical Stimulation of the Visual Cortex, J. Physiol. (London), 196, 479/493 (1968)
- 5) T. D. Sterling, et al.: Visual Prosthesis, Academic Press (1971)
- 6) W. H. Dobbelle, et al.: Phosphenes Produced by Electrical Stimulation of Human Occipital Cortex, and their Applications to the Development of a Prosthesis for the Blind, J. Physiol. (London), 243 553/576 (1974)
- 7) W. H. Dobbelle, et al.: Artificial Vision for the Blind by Electrical Stimulation of the Visual Cortex, Neurosurgery, 5, 521/527 (1979)
- 8) I. J. Hochmair-Desoyer, et al.: An Eight Channel Scala Tympani Electrode for Auditory Prostheses, IEEE Trans., BME-27, 44/50 (1980)
- 9) I. J. Hochmair-Desoyer, et al.: Cochlear Prostheses in Use, Recent Comprehension Results, Arch. Oto-Rhino-Laryngol. (Germany), 229, 81/98 (1980)
- 10) E. S. Hochmair, et al.: An Implanted Auditory Eight Channel Stimulator for the Deaf, Med. Biol. Eng. Comput., 19, 141/148 (1981)
- 11) N. Y. S. Kiang, et al.: Fundamental Consideration in Designing Auditory Implants, Acta Otolaryngol, 87, 234/218 (1979)
- 12) D. K. Eddington, et al.: Auditory Prostheses Research with Multiple Channel Intracochlear Stimulation in Man, Ann. Otol. Rhinol. Laryngol, 87, 1/39 (1978)
- 13) M. Soma, et al.: Integrated Circuits Fabrication for an Implantable Multichannel Neural Stimula

- tor, Proc. Custom Integrated Circuits Conference, 28/30 (1980)
- 14) 鈴木, 鳥山, 比企: 植込型人工中耳の技術開発の展望, 音響学会誌, **36**, 108/109 (1980)
 - 15) P. Bach-y-Rita: Brain Mechanism in Sensory Substitution, Academic Press (1972)
 - 16) C. C. Collins, et al.: Mobility Studies with a Tactile Image Device, Proc. 4th Annual Conf. Systems & Devices for the Disabled, 170/174 (1977)
 - 17) 和氣, 清水, 和氣: 触覚による3次元情報の知覚と視覚代行, 人間工学, **16**, 27/35 (1980)
 - 18) 感覚代行シンポジウム, 第1回~第6回, 製品科学研究所 (1975~1980)
 - 19) R. W. Mann: Technology and Human Rehabilitation, Prostheses for Sensory Rehabilitation and/or Sensory Substitution, Advances in Biomedical Engineering, **4**, 209/353, Academic Press (1974)
 - 20) G. F. Dalrymple: Development and Demonstration of Communication Systems for the Blind and Deaf/Blind 'Braille Communication Terminals and Tactile Paging Systems', Final Report, Sensory Aids Evaluation and Development Center, M. I. T. (1973)
 - 21) 平岡: 点字複製装置一点字情報処理を中心として, 第4回感覚代行シンポジウム論文集, 43/49 (1978)
 - 22) 米沢, 池本, 西本, 宮崎: レリーフ像を出力するファクシステム, 第5回感覚代行シンポジウム論文集, 34/37 (1979)
 - 23) E. E. Fournier d'Albe: The Optophone: An Instrument for Reading by Ear, Nature (London), **105**, 295/296 (1920)
 - 24) G. C. Smith, et al.: Visotoner, Bull, Prosthetics Res., **10**, 98/124 (1966)
 - 25) G. C. Smith: The Streotoner-A New Reading Aid for the Blind, 25th ACEMB, Alliance for Engineering in Medicine and Biology, 157 (1972)
 - 26) M. P. Beddoes, et al.: Evaluation and a Method of Presentation of the Sound Output from the Lexiphone, IEEE Trans., **BME-18**, 85/91 (1971)
 - 27) 和氣, 加賀, 二矢田, 渡辺: 聴覚を利用した文字読取器, 第3回感覚代行シンポジウム論文集, 75/80 (1977)
 - 28) J. C. Bliss, et al.: Optical-to-Tactile Image Conversion for the Blind, IEEE Trans., **MMS-11**, 58/65 (1970)
 - 29) J. G. Linvill: PVF 2-Models, Measurements, Device Ideas, Technical Report No. 4834-3, Stanford Univ. (1978)
 - 30) G. L. Goodrich, et al.: Kurzweil Reading Machine: A Partial Evaluation of its Optical Character Recognition Error Rate, J. Visual Impairment & Blindness, **73**, 389/399 (1979)
 - 31) 清水: 私信 (1981)
 - 32) 吉本: 感覚の代行と補助, 電子通信学会誌, **62**, 44/52 (1979)
 - 33) 吉本: ろうあ者の触覚による音声認識, 計測と制御, **14-12** 919/926 (1975)
 - 34) 田中, 村上: 盲人単独行動技術の実際, 理学療法と作業療法, **8**, 629/634 (1974)
 - 35) R. E. Hoover: New Outlook Blind, **40**, 246/251 (1946)
 - 36) L. Cranberg: Sensory Aids for the Blind, Electronics, **19**, 116 (1946)
 - 37) J. M. Benjamin, Jr. et al.: An Improved Laser Cane for the Blind, IEEE Inter. Con. Tech. Paper, 107/109 (1974)
 - 38) L. Fornaeus: The Swedish Laser Cane for the Blind, FOA 2 Report, C 2654-H 5 (1974)
 - 39) G. Jansson, et al.: The Effect of the Range of a Laser Cane on the Detection of Objects by the Blind, Report 211, Univ, Uppsala (1977)
 - 40) D. L. Morrisette, et al.: A Follow-up Study of the Mowat Sensor's Applications, Frequency of Use, and Maintenance Reliability, J. Visual Impairment & Blindness, **75**, 244/247 (1981)
 - 41) A. G. Dodds, et al.: The Nottingham Obstacle Detector: Development and Evaluation, *ibid.*, **75**, 203/209 (1981)
 - 42) D. Bissitt, et al.: An Application of Bio-feedback in the Rehabilitation of the Blind, Applied Ergonomics, **11**, 31/33 (1980)
 - 43) L. Russell: Travel Pathsounder-Further, Results, Proc. Int. Conf. on Sensory Devices for the Blind, St. Dunstons, London (1966)
 - 44) L. Kay: Ultrasonic Spectacles for the Blind, *ibid.* (1966)
 - 45) M. Onda: Comprehensive Automobile Traffic Control-Route Guidance and other Subsystems, Proc. 8th Int. Road Federation Meeting Doc. (1977)
 - 46) 館, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 細田, 藤村, 中島, 加藤: 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**, 279/289, 東大出版会 (1978)
 - 47) 館, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 清水, 松田: 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**, 208/219, 東大出版会 (1980)
 - 48) 館, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 細田: 視線可動型センサを用いる自律移動機械の移動制御, バイオメカニズム, **6**, 東大出版会 (掲載予定)
 - 49) 館, 谷江, 阿部: 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果, 医用電子と生体工学, **15**, 315/320 (1977)
 - 50) 谷江: 感覚代行の最近の進歩, 計測と制御, **18**, 92/99 (1979)
 - 51) R. W. Mann: The Evaluation and Simulation of Mobility Aids for the Blind, A. F. B. Research Bulletin, 1/62 (1965)
 - 52) S. Tachi, et al.: A Quantitative Comparison Method of Display Scheme in Mobility Aids for the Blind, VIIIth Int. Con. Biomechanics, 271, Nagoya (1981)
 - 53) M. M. Uslan, et al.: Toward the Development of a Prototype Computerized Travel Aid, American Foundation for the Blind (1981)
 - 54) J. A. Brabyn, et al.: Instrumentation System for Mobility Aid Simulation and Evaluation, IEEE Trans., **BME-25**, 556/559 (1978)