

感覚代行装置——研究の現状と将来——*

館 暁**

1. はじめに

「失われたものを数えるよりも残されたものを数えよう」という言葉を掲げて、目や耳の不自由な人々は、限りない残存感覚の世界を求めてひたむきの努力を重ねている。

一方、超 LSI、半導体センサ、マイクロプロセッサ等のエレクトロニクスの最近の進歩にあいまって、それらと残存感覚機能とを巧みに利用して失われた感覚を補い代行してゆこうとする研究が盛んになってきている。

このような感覚代行 (sensory substitution) あるいは感覚補綴 (sensory prosthesis) においては、通常、例えば視覚の場合には半導体カメラ、聴覚の場合にはマイクロフォンといった損失した感覚に対応した人工感覚器 (センサ) を用いて外界のデータを収集し、それらの内から特に重要な因子を選択し、その抽出された情報を適当な刺激形態に変換し生体に呈示する。第1図にその概念図を示してある。外界や対象を探る際、通常の人のように外界の光や音を採取するのみならず、例えばコウモリが超音波を発するがごとく、装置が能動的にイルミネーションを行い、その際のデータを利用する場合もある。情報抽出はきわめて重要なプロセスであるが、現在開発されている装置の中には単なるデータ形態の変換 (例えば視覚データ→触覚データ) のみにとどまっているものも少なくない。呈示に関しては、損失感覚器からの情報が中枢に伝わる径路のうち機能が残されている部分から中枢に向かって呈示する方法 (図中の①) が一応理想的と思われる。しかし、実際には、これはきわめて困難であり通常は図中②のように、例えば、皮膚感覚のような残存感覚

器を利用している。

上記の過程中、大きく分けて、1) 外界のデータの採取法、2) 外界あるいは対象に関するデータのうち人にとって重要な情報を取捨選択する抽出法、3) 残存感覚を利用して人に呈示するための呈示法、の3種の研究が重要である。

1), 2) については、それぞれ個別の問題について、それぞれの方法で解決が画られているのが現状であって、系統的な研究は見あたらない。

3) については、そのうち特に皮膚感覚を代用感覚として利用する場合の情報伝達に関して精神物理学方法に基づく基礎的かつ系統的な研究が行われている。

本稿では、1), 2) の問題について、目的別にまとめて、個々の装置について、それらを概説している。3) については、現状の成果が詳しくまとめられて紹介されている最近の解説¹⁾にゆずり、ここでは総合的な評価をも含む人間・装置・環境シミュレータの研究などの新しい動向について紹介する。

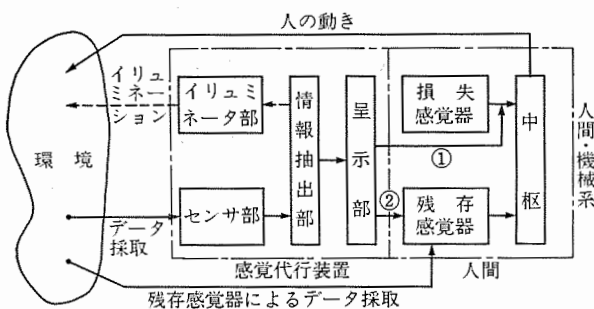
2. 盲人用視覚代行装置

全国 40 万人ともいわれる盲人の要望は、1) 書物や手紙などを通じての読み書きといったコミュニケーションと、2) 単独な自由行動をめざす歩行の問題の解決であるといわれている。それに加え、3) 外界の状況をパターンとして把握する環境認識問題の解決が次の段階として望まれるであろう。

2.1 文字読取装置

フランスの音楽家で教育者であり自分自身も盲目であった Louis Braille (1809~1852) の発明になる点字は、最近の電子計算機の進展期に至るまでは、ほとんどそのままの形で利用されてきた。最近電子計算機による通常の文字から点字への変換ソフトウェアの発展と、点字作製のハードウェアの開発により新たな展開がみられている。すなわち OCR のような読取り装置や、エディタや点訳プログラムといった計算機工学での成果のテクノロジートランスファーと発泡インクなどを利用した点字作製装置の開発などである²⁻⁴⁾。

それが、さらに進展すれば、特許公報などの漢字読取り装置⁵⁾などの文字識別技術と、音声合成技術⁶⁾を組み合わせることにより、活字のタイプを限定すれば本を代読するような形で読書を代行する装置があらわれ、図書館のような公共の場において利用できるのも時間の問題と言えよう。



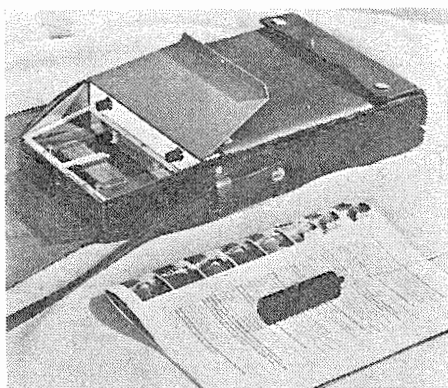
第1図 感覚代行装置の概念図

* 昭和54年3月29日受付

** 機械技術研究所システム部

それにしても、月刊誌や週刊誌、パンフレット、あるいは手紙のように点訳されにくいものが残されることは避けがたい。そのような広範囲な要求に応えるものとしては、J.C. Blissら⁷⁾が開発し実用化した Tele-sensory Systems 社 (TSI) の Optacon がよく知られて全世界で約 5000 台が利用されている⁸⁾。

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 のバイモルフ型の圧電素子を駆動して呈示する。盲人は左手の人差し指の先でそれを判別し文字を読み取る。さらに付属品を利用してカリキュレータの LED ディスプレイを読んだり、オシロスコープの波形を読み取ったりすることも可能である (第 2 図)。



第 2 図 Optacon による文字の読取り

約 50 時間の基礎訓練が必要で、その後数か月の経験をつめば、英語の場合 1 分間に 50~80 語の読取りが可能であるという。日本語の場合も、ひらがな、カタカナについては同程度であるとされているが⁹⁾、漢字についてはむつかしく、さらに日本での独自の研究を必要とするであろう。なお、基礎的な研究としては、末田ら¹⁰⁾の 10×10 の圧電振動子を用いたカナ文字触読装置がある。

文字を聴覚表示するものとしては、Fournier d'Albe の Optophone¹¹⁾、G.C. Smith の Visotoner¹²⁾、Stereotoner¹³⁾、M.P. Beddoes の Lexiphone¹⁴⁾、和気らの装置¹⁵⁾などがある。これらは、ラインセンサやアレイセンサを用いて文字を読み取り、そのパターンにあわせて周波数や強度を巧みに変化させ、文字により音のパターンの異なる特徴のある音を出力するようにしたものであり、Visotoner、Lexiphone で 40 語/分、Stereotoner で 50 語/分程度とされているが、いずれも実験例が少なく、その完全な評価は今後の研究に待つところが多い。

上記の装置は音を利用してはいるが、いわば無意味な音の系列であって音声ではない。言葉は本来は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、文字単位、できれば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。

そのような試みのための基礎研究が行われはじめており¹⁶⁻¹⁸⁾、走りとして、カリキュレータの計算結果を音声で発話する装置が TSI の SPEECHPLUS として開発されている⁸⁾。

最終的な方向としては、個人用の装置としても、前述した公共的な装置と同様、文字読取り装置で入力した文字を識別し、それに対応した音声を音声合成装置から出力する方法の進展が今後強く望まれる。

2.2 歩行誘導装置

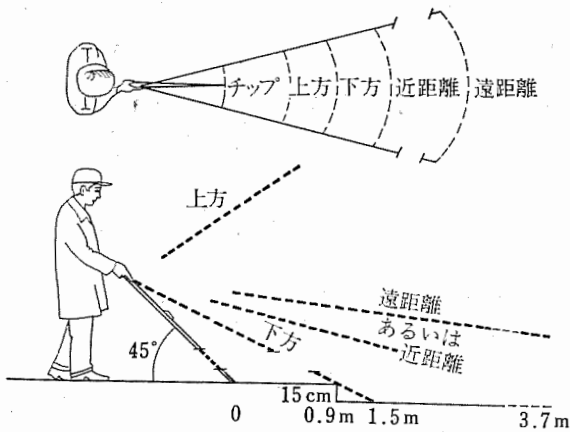
盲人の単独行動 (independent travel) への要望は強い。それを可能にするための二つの因子として、orientation と mobility があげられる¹⁹⁾。前者は、ある環境での自己と物の位置関係を認知し空間に位置づけることであり、後者は、人間が自力で空間の一点から他の一点に安全かつ効果的に移動する過程であるとされ、この二つは互いに密接に関連している。それは技術的に考えれば、道案内を含む盲人の誘導の問題と障害物検出および回避の問題ととらえることもできよう。

障害物検出および回避の問題の解決法の一つに従来の白杖による歩行²⁰⁾の延長として、それにエレクトロニクス技術を導入し、より高性能で扱いやすいものにしてしようとする試みがあり注目される。

この種の試みの概念は、Cranberg²¹⁾ によるといわれ、光を発しその反射をとらえて障害物の有無を判定しようとするものである。最近、GaAs レーザ (9000 Å) を光源とすることにより軽量かつ低エネルギーで細いビームの光を利用できるようになり飛躍的に進展した。Benjamin は²²⁾、三つの GaAs 素子により 0.2 μs のレーザパルスを上、前、下の三方向に毎秒 40 回発射し、その反射光を上方、前方用としては直径 12.7 mm、焦点距離 9.6 mm、下方用としては直径 18 mm、焦点距離 20 mm 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た。その反射光の強弱により障害物の有無を検知し、上、前、下方それぞれ 2500 Hz の音、人差し指への振動刺激あるいは 1600 Hz の音、200 Hz の音刺激として呈示するレーザ杖を開発した (第 3 図)。重量は約 500 g、直径 2.5 cm で 6 V の NiCd 電池で駆動され約 2 時間利用できるという。現在、5 番目のモデルが開発され National Research Council の補綴研究開発委員会で評価実験が行われている。

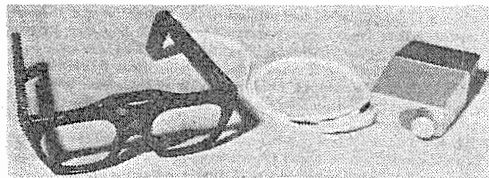
スウェーデン国防研究所 (FOA) では²³⁾、レーザ素子一つにしてグラスファイバを用いたレーザ杖を開発した。これは毎秒 100 回のパルスを発射し前方と上方の障害物の有無を知らせるものであり、評価実験が続けられている²⁴⁾。

コウモリは、周波数変調された超音波パルスを発し、その反射音から自分と環境の関係をつかみ巧みに飛翔

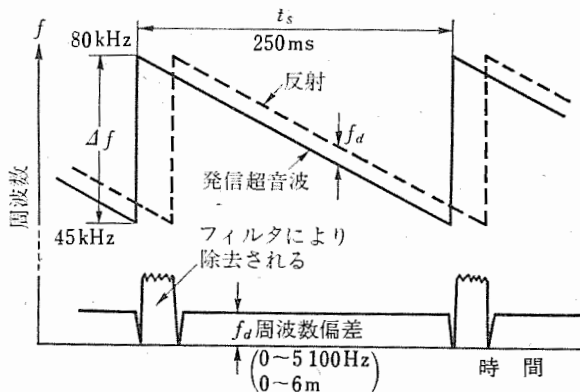


第3図 レーザ杖による障害物の検出

する。Kay は²⁵⁾ 超音波による障害物検出機構を巧妙な回路で実現し、送受信素子を眼鏡にしこんだ超音波眼鏡を開発した(第4図)。これは SONIGUIDE として商品化されているもので、第5図の実線で示されているように、周期的に周波数の変化する超音波を発振し、これと破線で示す受信した反射波の周波数の差を求める。この差は障害物までの距離に比例する量となっていて、しかも人の耳に聞こえる周波数であるため、それを音刺激として第4図に示すように眼鏡の腕に内蔵された一対のイヤフォンから細いビニール管を通して両耳に与える。



第4図 超音波眼鏡の概観



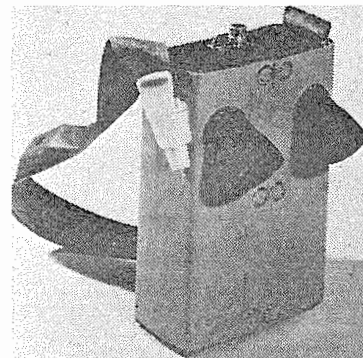
第5図 超音波眼鏡の距離-周波数変換原理

もし障害物がこの装置の正面にあれば、左右の受信素子に入るエコーは同位相、同強度であり両耳には同じ可聴刺激音が与えられ、距離が短くなるにつれ、その周波数は低くなり、障害物が一側に寄れば、その側が低音となる。さらに、反射面の性質の違いは音色の差として探知しようという。13名の白杖の経験豊富な盲人を対象としたフィールドテストが行われており、

さらに全世界にフィールド調査を依頼し 94 名に 167 項目にわたるアンケート調査を行った。その結果 75 名の回答を得たが、その内 79% がこれからも眼鏡を持ち続けたいと答えている²⁶⁾。

補助装置開発当初における単に前面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。この考えの起こりは、第二次大戦で失明し、後に M. I. T. の感覚補助装置評価開発センター (SAEDC) の所長となった Dupress の「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」という独自の歩行法によるといわれる²⁷⁾。

この考えに基づいて首からかけて利用する Path-sounder²⁸⁾ が生まれた(第6図)。その原理は盲人の正面のドアの大きさ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時のみ音でそれを知らせるというものである。ただし、杖と併用することを前提としており足もとは調べていない。



第6図 Russell の Pathsounder の概観

その他の超音波利用の装置としては、Mowat Sonar Sensor, Habelt 社の Siemens 眼鏡, Nottingham Obstacle Detector, わが国では、井出らの研究²⁹⁾, 東伸電気のソノスペック, 海上電気のソノダなどがある。また、レーザを利用したものとしては、Mims 眼鏡, 光学センサを利用したものとしてはイリノイ大学の Caecotram Tube がある。

さて、道案内を含む盲人の誘導の問題については、例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³⁰⁾などのテクノロジートランスファーとして盲人を誘導しようという試みがあったが、環境への投資が大きすぎることなどの理由から実現してはいない。災害時における一般用の避難補助用とを兼ねるシステムに高めることで実現されることが期待される。

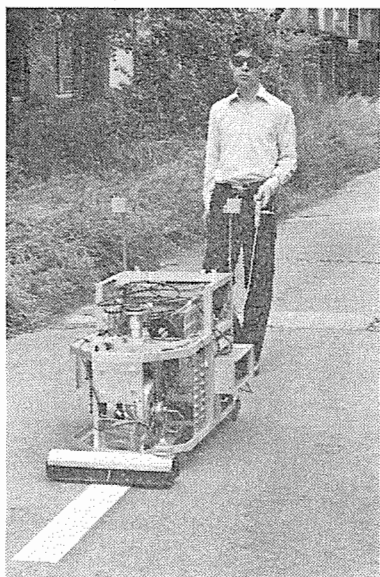
地図を盲人が利用できれば、という願いに対する一つの解答がレリーフ状にプレスして作製された盲人用タクトイルマップであり³¹⁾, 道順や、重要な目印をカ

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³²⁾。

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も最も優れた機能を有するものと考えられているが、動物であるがゆえに固有のいくつかの欠点を有することも事実である。

そうした盲導犬をモデルとして、その長所のみをできるだけ工学的に実現することにより、より有効な歩行補助手段を提供しようとする研究が始められている³³⁾。これは、街路の交差点などの要所にランドマークと呼ぶ簡単なマークを離散的に敷設し、歩行誘導機械(盲導犬ロボット)内に記憶してあるそのマークに関するマップを利用して、盲人の命令に従いながら盲人を誘導し、ロボットの運ぶ半導体イメージセンサや超音波センサを用いて障害物検出を行う。通常の状態では盲人はロボットのことは意識せず自分の残存機能を十分に発揮して歩行できる。障害物を検出し危険な場合のみロボットが盲人にそのことを知らせ停止する。盲人は従来の杖に加えてロボットをも自分のセンサのごとくに利用し、環境をタクトイルテレビジョン方式などで認識し、判断し、次の行動を起こすシステムが計画されている。

現在のところ MARK II までの試作が完了しており、超音波距離計測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する機能、およびマップを利用してランドマークによりロボット、従って盲人を誘導する機能の実現に成功している(第7図)³⁴⁾。なおこの際の機械から人間への情報伝達には電気刺激を利用して、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となるように制御し、それにより感覚強度が変化しないよう工夫している^{35,36)}。



第7図 盲導犬ロボット MELDOG MARK II による街路誘導実験

2.3 視覚補綴をめざした研究

正常な視覚は、網膜上に生じた外界の像に対応した刺激を、外界に投影し直すことにより、空間の広がりの中に物体を位置づけそれらを認識している。そのような機能を持つ真の意味での視覚補綴は可能であろうか。

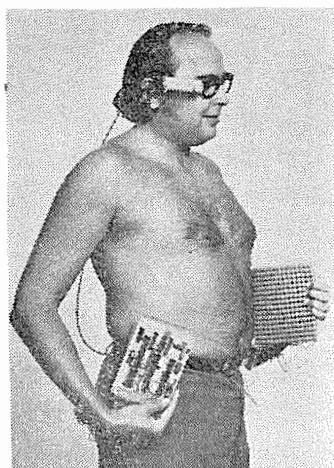
ここでは、脳の柔軟性に富んだ適応性を前提として皮膚を網膜の代用として利用して実現しようとする方法と、第1図の①の一方法として、脳の視覚情報処理に関係した皮質部分を刺激することにより実現しようとする試みについて紹介する。

前者の最初の概念は、Starkiewiczら³⁷⁾によって提案されている。後に Bliss らも前述した Optacon の研究の延長として 12×12 のフォトトランジスタアレイカメラからの出力を、2.5 cm 四方程度のバイモルフ振動子で指に呈示し物体認識の研究を行った³⁸⁾。Bliss は、この方法は、皮膚感覚は視覚に比べ潜時が長く、弁別の分解能がせいぜい数百程度で、画像情報に必要な最低の分解能 25 000 点にはるかに及ばないことなどから、皮膚を網膜の代わりに使うことにきわめて否定的であった。

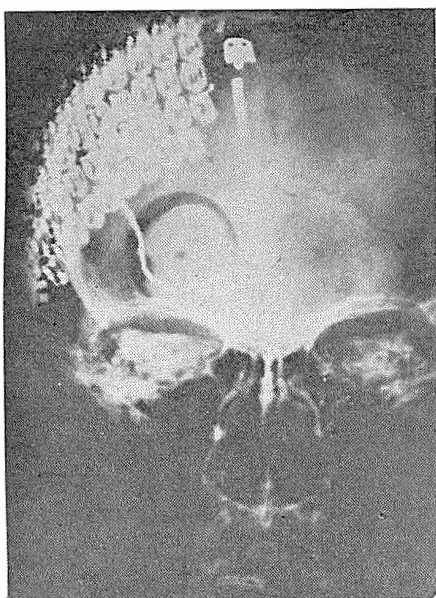
一方、Bach-y-Rita らは、皮膚感覚を利用することにより視覚で得られるのと同様の経験ができることを主張している³⁹⁾。それらの研究は総称して TVSS (Tactile Vision Substitution System) と呼ばれ、その初期のものはビジョンによって撮像し、それを、20×20 のドットパターンに変え、歯科用椅子の背に組み込んだ電磁式振動子により人の背中に振動刺激として呈示する装置であった。500 Hz のパルスレインを 8 ms ずつ 25 回/秒の割合で呈示し、それに対応する画素が閾値をこえていることを表わしている⁴⁰⁾。

現在、レチコンの半導体センサを眼鏡のフレームに取り付け、外界の像を入力し、最大 32×32 の絵素を腹部に電気刺激あるいは振動刺激を用いて呈示する携帯用の装置が開発されている(第8図)。また、わが国では、和気らが同様の装置を開発し、最適刺激呈示条件などを調べ始めている^{41,42)}。カメラをズームすると、それに伴い像のズームが生じたり、傾いたチェックボードの傾きがわかったり、回転物体の三次元的な解釈を行ったり、人の顔を識別したりできると報告されているが、残念ながら記述的な説明のみで定量的なデータはない。

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⁴³⁾。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与えることで視覚代行を行う試みとその結果を報告した⁴⁴⁾(第9図)。これが後者のアプローチの始まりである。電気刺激は外部から、頭蓋骨と表皮の間に収められた受信器を介して、皮質上の 80 個の埋込電極に伝えられ



第8図 携帯用の TVSS (Tactile Vision Substitution System)



第9図 Brindley らにより行われた大脳直接刺激による視覚代行システムの試み

る。全体の半分以下の電極しか実際には作動しなかったが、それでも4ないし5の電極により生じる幾つかの簡単なパターンを盲人が識別しえたと言われている。通常、閃光は刺激が無くなるとすぐに止むが、強い刺激を与えると、場合によっては2分間以内の影響が残る場合があるという。

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、また正常の視覚のような外界への像の投影が生じるのかといった認識論的議論、さらに、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⁴⁵⁾。

また、Mladejovsky らも、64 個の電極を利用して計算機により制御されるシステムで、刺激部位と閃光パターンとの対応関係を示すマップを作成するための

研究を行っているが^{46,47)}、まだパターン情報を伝達するには至っていない。

ともかく、まだ脳についてはあまりにもわずかのことしか解明されていない現状や、安全性の問題の未解決の点、また、たとえそれらがすべて解決したとしても、先天盲や早期失明者の開眼手術後の大きなとまどいの報告^{48,49)}と同様なことが生じないかという不安を考えると、今後検討すべき多くの問題が山積みに残されていると言えよう。

3. ろう者用聴覚代行装置

鼓膜、つち・きぬた・あぶみ骨等の機械力学的な伝音系の欠陥以外のいわゆる感覚神経性難聴者に対して、その障害に応じて基底膜上の有毛細胞や聴覚神経系あるいは大脳皮質を電気刺激し情報伝達する試みがなされている。

House⁵⁰⁾ や Michelson⁵¹⁾ は蝸牛内の正弦波電気刺激を行った。Mladejovsky⁵²⁾ は複数個の電極で刺激部位を変えピッチ感覚に近い感覚を与える努力を行っている。それらは、唇読法の補助としては役だっても、そのみで音声などを識別するにはほど遠い。

聴神経を刺激する実験は Simmons⁵³⁾ により行われている。さらに、大脳の聴覚領域を刺激する試みが Dobbie ら⁵⁴⁾ により試みられている。後者の方法は、有毛細胞部、聴覚神経系、中枢神経系の障害の場合など幅広く利用できる可能性を有するが、外科的手術の困難さや、刺激条件とそれにより生ずる音の感覚との対応づけが全く未解決であるなど、音声を伝えるに至るまでには解決すべき膨大な量の困難な問題がひかえている。

もう一つの方法として、視覚、触覚といったろう者の残された正常な感覚を利用することが考えられる。実際、視覚代行の TVSS にあたる装置が、ろう者用として吉本ら⁵⁵⁾ により研究されている。

これは一種のボコーダで、音声を小型マイクロフォンで受け、その出力を 16 組のフィルタを用いて周波数分析し、200~300 Hz の振動に変換して 16×3 個の圧電振動子アレイで人の指に呈示する。音の強さは振動の強さとし、同一周波数の出力を 3 列用意することで子音などの識別時に特別な工夫がはらえるよう考慮されている。

現在までに母音については、話者が限定され学習を重ねればほぼ 100% の識別率が達成でき、子音についてはスキャン型呈示を行い神経回路特性を付加するなどして 80% 程度を実現している。

4. 義肢用皮膚感覚・深部感覚代行装置

義手や義足を自分の手や足と同じように制御し利用するためには、義手や義足の関節の変位位置や手先の開き量といった、従来は深部感覚として得ていた情報や、接触覚や圧覚といった切断前には皮膚感覚として受容

していた情報を、なんらかの方法で使用者が得る必要が生じる。

初期の研究では、義手に取り付けられた位置センサや触覚センサの出力を機械的振動刺激に変換し、使用者の皮膚に呈示していた。Mann は Boston Arm のプロジェクトに伴い義手の感覚フィードバックに関する多くの研究を行った⁵⁶⁾。また Alles は⁵⁷⁾、ファントムセンサーションを利用して義手の肘の角度を伝達する試みを行っている。

最近では携帯性を指向する点で電気刺激を利用する方法が主流となっている。電気刺激に関しては Beeker⁵⁸⁾ や加藤ら⁵⁹⁾ による先駆的な実験がある。Prior ら⁶⁰⁾ は手先部の圧覚と開き量をパルス幅変調した電気刺激として皮膚表面へ呈示し、それによる義手操作性の向上を確かめている。

また、Reswick ら⁶¹⁾ は、前腕筋電義手の手先の圧覚情報を直接神経に挿入したワイヤ電極を介して周波数変調された電気刺激としてフィードバックする研究を行っている。

この種の神経を直接刺激する方式による伝達情報量は、皮膚表面電極を用いる方法のそれとほぼ同程度ではあるが⁶²⁾、刺激電流が筋電電極に混入して系が誤動作することが防げる長所を有する。実用化の最大の問題は、生体内部と外部のエネルギー伝達の問題である。Reswick は、バイオカーボンボタンと呼ばれる皮膚貫通端子を利用して3か月間の生体内実験に成功

しているが、完全に実用化するまでには至っていない。

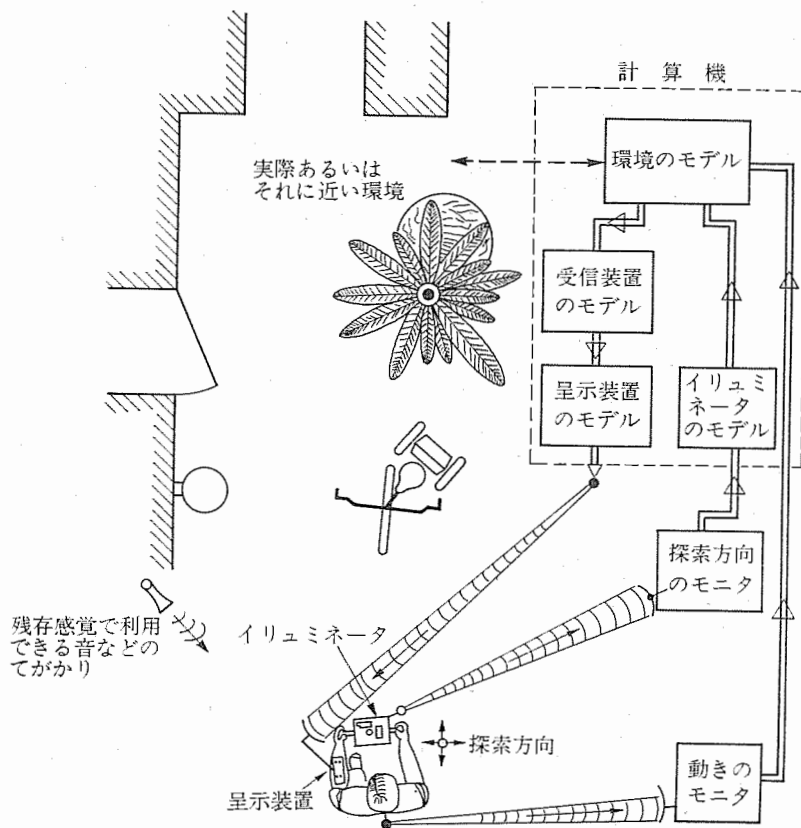
義足については、広川ら⁶³⁾ による装置の開発およびそれによる実験が行われている。後者は、足底4か所のテープスイッチからオンオフ情報を大腿部4面の電極へ、また、ゴニオメータからの角度情報を断端縫合部近傍の複数電極対へ伝達するもので、通常の義足を利用した場合との定量的な比較評価実験が待たれる。

5. 人間・装置・環境シミュレータ

感覚代行装置の設計における問題点は、(1)外界の状況をいかに取り込むか、(2)その内のどのような情報を抽出するか、(3)それをどのような形で使用者に呈示するかを明らかにすることであるが、系統的な研究は(3)に関するもののみしかなく、その時々研究者のアイデアに依存しているのが現状である。

Mann は⁶⁴⁾、外界の環境と、計算機内のそのモデルを利用して、その環境内で被験者に実際の行動を起こさせ、その時使用している感覚代行装置の動きやそれからのデータ、また被験者の動きを実時間でとらえ計算機内に取り込みながら、感覚代行装置からの情報(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、どのような形で呈示すれば被験者が通常人に近い形で行動できるかを調べることの重要性を指摘した(第10図)。

この人間・装置・環境シミュレータは、視覚代行装



第10図 人間・装置・環境シミュレータ

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はなく、すでに開発されている装置の定量的な評価にも役立つ。

例えば第 10 図で、すでに開発されている装置を利用して被験者が研究室内の実際の環境を歩行し、その時の人の位置、速度、加速度などを計算機に実時間でテレメータし計測する。その時の動きと正常な人の動きとの差を評価量として利用して各種装置を評価する方法が考えられよう。

M. I. T. では、そのためのプロジェクトを組んで研究を続けており⁶⁵⁾、また Brabyn らも⁶⁶⁾最近同様の研究を始めるなど、この種の方向の進展が今後期待される。

6. おわりに

感覚代行研究の現状を、感覚器別に主に装置の開発の面から紹介した。文字読取り装置関係は、最新の計算機技術のテクノロジートランスファーにより実用段階を迎えつつあるが、歩行誘導装置や視覚補綴などは、まだまだ研究し解明すべき基礎的な事項を多く残している。

現在、基礎的なデータの積み重ねは主に情報のディスプレイ関係に限られており、人間・装置・環境シミュレータのような情報パラメータ抽出に関する基礎的な研究の進展が期待される。

終りに、本稿の執筆にあたり、貴重なご討論をいただいた機械技術研究所バイオメカニクス課、谷江和雄主任研究官に謝意を表する所である。

文 献

- 1) 谷江和雄：感覚代行の最近の進歩，計測と制御，18-1，92/99 (1979)
- 2) 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)
- 3) 長谷川貞夫，根本 幾，田中 剛，斎藤正男：点字による漢字標記と電算写植システムを利用した点字文・通常文変換，第 14 回日本 ME 学会大会論文集，599/600 (1975)
- 4) 平岡省三：点字複製装置——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)
- 5) 坂井邦夫，平井彰一，河田 勉，天野真家，森 健一：漢字カナ混り文を読みとる印刷文字認識システム，電気学会全国大会，S5-3/S5-6 (1978)
- 6) 藤崎博也：音声研究の現状と将来，日本音響学会誌，34-3，117/121 (1978)
- 7) J. C. Bliss, M. H. Katcher, C. H. Rogers & R. P. Shepard : Optical-to-tactile image conversion for the blind, IEEE Trans., MMS-11-1, 58/65 (1970)
- 8) R. W. Mann : Electronic technology in human rehabilitation, Electronics+5, Paris (1977)
- 9) 小柳恭治，山根 浩，志村 洋，千田耕基，永田三郎：

オプタコンによる読みの実際例，第 2 回感覚代行シンポジウム論文集，1/8 (1976)

- 10) 末田 統：盲人用感覚補助装置——試作 RAB 2 号機について——，電気学会視覚情報研究会資料，VIN-75-2 (1975)
- 11) E. E. Fournier d'Albe : The Optophone: An instrument for reading by ear, Nature (London), 105, 295/296 (1920)
- 12) G. C. Smith & H. A. Mauch : Bull. Prosthetics Res., 10-6, 98/124 (1966)
- 13) G. C. Smith : The Stereotoner—A new reading aid for the blind, 25th ACEMB, Alliance for Engineering in Medicine and Biology, 157 (1972)
- 14) M. P. Beddoes & C. Y. Suen : Evaluation and a method of presentation of the sound output from the Lexiphone—A reading machine for the blind, IEEE Trans., BME-18, 85/91 (1971)
- 15) 和気典二，加賀謙二，二矢田勝行，渡辺泰助：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)
- 16) J. Allen : Reading machines for the blind : The technical problems and the methods adopted for their solution, IEEE Trans., AU-21-3, 259/264 (1973)
- 17) C. Y. Suen & M. P. Beddoes : Development of a digital spelled-speech reading machine for the blind, IEEE Trans., BME-20-6, 452/459 (1973)
- 18) R. Kooi & W. C. Lin : An on-line minicomputer-based system for reading printed text aloud, IEEE Trans., SMC-8-1, 57/62 (1978)
- 19) 田中一郎，村上琢磨：盲人単独行動技術の実際，理学療法と作業療法，8，629/634 (1974)
- 20) R. E. Hoover : New Outlook Blind, 40, 246/251 (1946)
- 21) L. Cranberg : Sensory aids for the blind, Electronics, 19, 116 (1946)
- 22) J. M. Benjamin, Jr. & N. A. Ali : An improved laser cane for the blind, IEEE Inter. Con. Tech. Paper, 107/109 (1974)
- 23) L. Fornaeus : The Swedish laser cane for the blind, FOA 2 Report, C 2654-H 5 (1974)
- 24) G. Jansson & B. Schenkman : The effect of the range of a laser cane on the detection of objects by the blind, Report 211, University of Uppsala (1977)
- 25) L. Kay : Ultrasonic spectacles for the blind, Proc. Int. Conf. on Sensory Devices for the Blind, St. Dunstons, London (1966)
- 26) A. L. Ward : An evaluation of the ultrasonic binocular sensor in rehabilitation of the blind, Final Report of a Demonstration Project, Arkansas Enterprises for the Blind, INC. (1972)
- 27) 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)
- 28) L. Russell : Travel pathfinder—further results, Proc. Int. Conf. on Sensory Devices for the Blind, St. Dunstons, London (1966)
- 29) 井出正男，大平悦三：盲人用超音波歩行援助装置，第 1 回感覚代行シンポジウム論文集，130/135 (1975)
- 30) M. Onda : Comprehensive automobile traffic con-

- trol—route guidance and other subsystems, Proceedings of 8th International Road Federation Meeting Documentation, 1977.
- 31) A. M. Kidwell & P. S. Greer : Environmental perceptions of the blind and their haptic representation, M. Arch. Thesis, Dept. of Arch., M. I. T. (1972)
 - 32) J. A. Leonard & A. Carpenter : Trial of an acoustic blind aid, Res. Bull., American Foundation for the Blind, 70/119 (1964)
 - 33) 舘 障, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 阿部 稔, 細田祐司, 藤村貞夫, 中島英博, 加藤一郎 : 人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の方法, バイオメカニズム, 4, 279/289, 東大出版会 (1978)
 - 34) 舘 障, 小森谷清 : 盲導犬ロボットの研究, ロボット, 22, 72/83 (1979)
 - 35) 舘 障, 谷江和雄, 阿部 稔 : 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, 15-5, 315/320 (1977)
 - 36) 谷江和雄, 舘 障, 小森谷清, 阿部 稔 : 電気パルス刺激エネルギーに対する皮膚の強度感覚と丁度可知差異, 計測自動制御学会論文集, 13-6, 595/602 (1977)
 - 37) W. Starkiewicz & T. Kuliszewski : The 80-channel elektroftalm, Proceedings International Congress on Technology and Blindness, 1, 157/166, American Foundation for the Blind (1963)
 - 38) J. C. Bliss & K. W. Gardiner : A mobility aid for the blind to supplement the cane, Final Rep., Project 4213, Stanford Res. Inst. (1966)
 - 39) P. Bach-y-Rita : Brain Mechanism in Sensory Substitution, Academic Press (1972)
 - 40) C. C. Collins : Tactile television—mechanical and electrical image projection—, IEEE Trans., **MMS-11-1**, 65/71 (1970)
 - 41) 和気典二, 清水 豊 : 視覚代行システム, 計測と制御, 14-12, 910/918 (1975)
 - 42) 斎田真也, 清水 豊, 和気典二 : スモール TVSS の試作と最適刺激提示条件, 第4回感覚代行シンポジウム論文集, 68/73 (1978)
 - 43) O. Foerster : Beitrage zur Pathophysiologie der Sehbahn und der Sepsphere, J. Psychol. Neurol., 39, 463/485 (1929)
 - 44) G. S. Brindley & W. S. Lewin : The sensation produced by electrical stimulation of the visual cortex, J. Physiol. (London), 196, 479/493 (1968)
 - 45) T. D. Sterling, E. A. Bering, Jr., S. V. Pollack & H. G. Vaughan, Jr. : Visual Prosthesis—the Interdisciplinary Dialogue—, Academic Press (1971)
 - 46) W. H. Dobbelle & M. G. Mladejovsky : Phosphenes produced by electrical stimulation of human occipital cortex, and their application to the development of a prosthesis for the blind, J. Physiol., 243, 553/576 (1974)
 - 47) M. G. Mladejovsky, D. K. Eddington, J. R. Evans & W. H. Dobbelle : A computer-based brain stimulation system to investigate sensory prostheses for the blind and deaf, IEEE Trans., **BME-23-4**, 286/296 (1976)
 - 48) A. Valvo : Amer. J. Ophthalmol., 65-1 (1968)
 - 49) 鳥居修晃, 望月登志子 : 先天盲における開眼手術後の視知覚の構造化, 第1回感覚代行シンポジウム論文集, 71/81 (1975)
 - 50) W. F. House & J. Urban : Long term results of electronic implantation and electronic stimulation of the cochlea in man, Ann. Otol., 82, 504/510 (1973)
 - 51) R. P. Michelson : Electrical stimulation of the human cochlea, Arch. Otolaryngol., 93, 317/323 (1971)
 - 52) M. G. Mladejovsky, D. K. Eddington, W. H. Dobbelle & D. E. Brackmann : Artificial hearing for the deaf by cochlea stimulation : Pirch modulation and some parametric threshold, Trans. Amer. Soc. Artif. Int. Organs, 21, 1/6 (1975)
 - 53) F. B. Simmons : Electrical stimulation of the auditory nerve in man, Arch. Otolaryngol., 84, 2/54 (1966)
 - 54) W. H. Dobbelle, M. G. Mladejovsky, S. S. Stensaas & J. B. Smith : A prosthesis for the deaf based on cortical stimulation, Ann. Otol. Rhin. Laryngol., 82, 445/563 (1973)
 - 55) 吉本千禎 : ろうあ者の触覚による音声認識, 計測と制御, 14-12, 919/926 (1975)
 - 56) R. W. Mann & S. D. Reimers : Kinesthetic sensing for the EMG controlled 'Boston Arm', IEEE Trans., **MMS-11-1**, 110/115 (1970)
 - 57) D. S. Alles : Information transmission by phantom sensations, IEEE Trans., **MMS-11-1**, 85/91 (1970)
 - 58) T. W. Beeker, J. D. Doring & A. den Hertog : Artificial touch in a hand prosthesis, Med. Biol. Eng., 5, 47/49 (1967)
 - 59) I. Kato, S. Yamakawa, K. Ichikawa & M. Sano : Multifunctional myoelectric hand prosthesis with pressure sensory feedback—Waseda Hand 4 P—, Advances in External Control of Human Extremities, 155/170 (1970)
 - 60) R. E. Prior & J. Lyman : Electrocutaneous feedback for artificial limbs, Bull. of Prosthetics Research, 3/37, Fall (1975)
 - 61) J. Reswick, V. Mooney, A. Schwartz, D. McNeal, N. Su, G. Bekey, B. Bowman, R. Snelson, G. Irons, P. Schmid & C. Sperry : Sensory feedback prosthesis using intra-neural electrodes, Proc. of 5th ETAN (1975) (加藤一郎編 : 第3 人間の手足の制御, 学献社 (1977))
 - 62) A. B. Anani, K. Ikeda & L. M. Korner : Human ability to discriminate various parameters in afferent electrical nerve stimulation with particular reference to prostheses sensory feedback, Med. & Biol. Eng. & Comput., 15, 363/373 (1977)
 - 63) 広川俊二, 加藤清国 : 感覚義足系の開発とその評価に関する研究, リハビリテーション医学, 16-11, 33/40 (1979)
 - 64) R. W. Mann : The evaluation and simulation of mobility aids for the blind, A. F. B. Research Bulletin, 1/62 (1965)
 - 65) E. K. Antonsson : The derivation and implementation of a dynamic three-dimensional linkage analysis technique, M. Thesis, Dept. of Mech. Eng., M. I. T. (1978)
 - 66) J. A. Brabyn, H. R. Sirisena & G. R. S. Clark : Instrumentation system for mobility aid simulation and evaluation, IEEE Trans., **BME-25-6**, 556/559 (1978)