

## 【人工臓器】

## 人工臓器の現況と問題点 11) 人工感覚

館 障\*

## 1. はじめに

人工感覚器を字義的に考えれば体内に埋め込まれる埋込型のものが本来的には意味されるであろう。しかし、現在の段階で埋込型でしかも実用に供している感覚補綴 (sensory prostheses) はない。従ってその臨床的な評価も定まっていないことはいうまでもない。むしろ、臨床的には体内に埋め込まず、取りはずし可能な装着型や、ハンディな携帯型に設計されたものが、感覚補助器 (sensory aids)、あるいは感覚代行 (sensory substitution) という範疇で利用されているのが現状である。

後者においても、①人間の目や耳と同じように一つのデバイスによって多数の機能を実現しようとする汎用型の研究と、②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、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その方法論が分かれ、現時点では②の方式が優位にある。もっとも、それらにも多くの臨床的あるいは技術的な問題が山積しており、それらを解決する新しい技術的なブレイクスルーが期待されていることはいうまでもない。

本解説では、人工感覚を広義に解釈し、感覚補綴と感覚補助器について、それらの臨床応用状況、研究開発状況を概観する。また、それらの ME 的問題点や評価、またその評価手法あるいは最適設計への試みなどについても言及する。

## 2. 臨床応用状況、研究開発状況

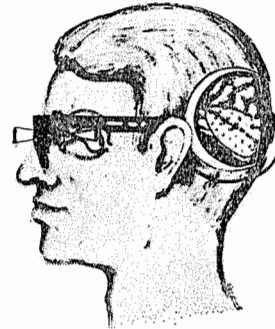
## 2.1 埋込型の現状

人間の脳後頭部の有線野に電気刺激を施すと、いわゆる閃光 (phosphenes) の感覚が生ずることが報告されたのは 1929 年のことであるが<sup>2)</sup>、電気現象を利用すれば盲人の視覚や聾者の聴覚をとりもどせるのではないかというアイディア自体は古く、Benjamin Franklin が Royal Society of London に雷に関する実験を報告した 18 世紀にさかのぼるといふ<sup>3)</sup>。

この phosphenes 現象を感覚補綴に初めて実験的

に利用したのが Brindley で、氏は 1968 年盲人の被験者の右大脳半球後頭部の灰質上に 80 個の電極を埋め込んだ<sup>4)</sup>。電気刺激は頭蓋骨と表皮の間に取められたレンズを介して外部エネルギーにより与えられた。作動した電極は 1/2 程度ではあったが、4ないし 5 個の電極により生ずるいくつかの簡単なパターンが識別されたと報告されている。

米国においてこの研究を発展させたのが Dobbelle である。氏は 1969 年から 4 年間にわたり脳腫瘍などで手術を受けた晴眼の 37 人の患者に対して手術時に直接電気刺激を行いその安全性を検討した。その後 1973 年から 1979 年にかけてボランティアの被験者に 64 個のプラチナ電極を埋め込み視覚補綴としての可能性を検討し、20 人年の経験をつんでいるという<sup>5)</sup>。第 1 図に Dobbelle らが理想としている視覚補綴システムの概念図を示す。しかし、この方向の研究は科学技術上の行きづまりと社会的な批判とから現在はあまり盛んではない。



第 1 図 W.H.Dobbelle の提案する人工眼の完成予想図

一方、蝸牛内に単一ないしは複数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 cochlear prostheses を中心とする埋込型聴覚補綴の研究が近年盛んになり注目を集めている。ユタ大学を中心とするグループには、かなり昔からこの種の研究の種があったが、現在は Eddington らによる組織的な研究へと発展している。氏は、基底膜にそった空間パターンと、それぞれの時間パターンをどのような形で聾者に提示すれば最適の情報伝達が行えるかという基礎的な

\* 機械技術研究所システム部バイオメカニクス課

検討を行いつつ、実際の埋込み実験を平行して行っている<sup>6)</sup>。

Hochmair-Desoyer らは、例えばディスク型の単電極を完全に聳のポランティアに埋込み実験を行い、読唇を併用せず音声だけによる弁別実験を報告している。その結果、例えば、1~99の数字を訓練なしに提示したところ38%の正解率を得、単語に関しては60%、文章に関しては60~100%の正解率を得たという<sup>7)</sup>。

また Engelman らは、9人の後天聾の患者に単電極埋込み手術を行ったところ、術前の拡聴器使用時に比べて著しい感覚閾値の改善がなされ、環境音やストレスパターンなどへの反応も生じるようになったという。発声もインフレクションを除いて改善がみられ、9人全員が1日最低8時間は利用していることなどから、リハビリテーションの見地からも有効であると報告されている<sup>8)</sup>。

## 2.2 感覚代行・補助装置の現状

汎用型の代表例は Bach-y-Rita が Smith-Kettlewell Institute にいた時に提案し実験を始めた TVSS (tactile vision substitution system) である<sup>9)</sup>。氏は、脳の柔軟性に富んだ可塑性を前提として、訓練を積みば皮膚を網膜の代用として利用できると考え、外界の情報をテレビカメラでとらえそれをドットパターンに変換して盲人の背中や腹部に提示し、眼の代用物とする方式を提案した。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型のTVSSにおいては、ほぼ外界の像と一対一の対応で像を提示していたが、それではやはり限界があった。その後、超音波のスキヤナを利用して外界を探索して、その結果を腹部の皮膚上に距離と方向の座標軸をとって二次元的に提示する方式や、カメラで得た風景などの画像を人工知能の方法などを用いて解釈し特徴を抽出し、その抽出情報を皮膚へ伝えるという方式に移行しつつある。

一方、機能分離型の設計法を視覚代行・補助装置を例にとりて説明すれば次のようになる。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すなわちモビリティの問題とに分け、さらに例えば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などに対象を細分し、歩行補助の問題についても、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、それぞれに適した最適設計をねらう方式である。

コミュニケーション機能のうち特に読み書きについ

ては、①従来の点字を手軽に使えるようにする例えば携帯式点字レコーダやペーパレスブレイルのような方向、②Optacon などのように通常の文字をそのまま触覚刺激に変換して伝える方向、③Kurzweil Reading Machine (KRM) のように文字を自動的に読み取り、単語単位で音声に変換して伝える方向の三つありの設計がある。①は特に電子式のノートのようにして盲人がメモをとって、その結果を取り出したりする場合などに有効であり、②は印刷物以外の手書き文字や図や表といったパター的なものに利用されよう。活字で印刷された本を読む場合には③の方式が最も盲人に好まれるようであり、現在、ゼロックス社から販売されている KRM は、最高1分間250語の割合でほぼすべての活字に対応して読取りを行えるという<sup>10)</sup>。

モビリティに関しても、(1)次の一步の確保、(2)オリエンテーションあるいはそのための環境認知、(3)道案内も含むナビゲーション、の三つの機能が完成されなくては真の単独歩行は実現できない。

(1)は障害物の検出の問題で最も歴史が古い。現在、最も有効な手段は Hoover Technique による白杖である。この使い方の改良<sup>11)</sup>、レーザなどを利用するエンハンスメント<sup>12)</sup>、あるいは「環境空間を貫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 Dupress 流の歩行方式に基づく Russell の Pathsounder を車いすと併用する研究の試み<sup>13)</sup>などが行われている。

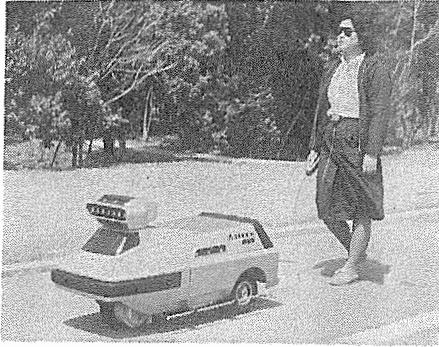
日本においても通産省医療福祉技術開発委託制度のもとでサンクスが実用的なレーザ杖の開発を進めており期待される。

(2)については現在のところ満足しうる補助装置はない。Kay の Sonic Guide は、(1)の機能に加えて、反射面の違いを音色の差として提示したり、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など、自己と環境との関係のある程度つかむことのできるため environmental sensor と呼ばれており、この機能を一部めざしている<sup>14)</sup>。わが国においても、上記委託制度のもと東伸電機が改良型の超音波補助器を研究開発しており期待されている。

(1)から(3)の機能を総合した意味での盲人の歩行補助は、介助者がいっしょに同行するか、あるいは盲導犬により行われている。

機械技術研究所では、(1)から(3)までの機能を総合的に実現するための研究開発として、盲導犬の一つのモデルとした歩行誘導機械の研究<sup>15,16)</sup>を行っている。現在のところ MELDOG と呼ばれる盲導犬ロボットの MARK IV までの試作と、それらを用いた基

礎実験が行われている(第2図)。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、マップを一種のオートマトンとして計算機内で表現し、ランドマークをセンサで的確に検出することにより、ロボット、従って盲人を自由に誘導する(3)の機能の確認、超音波センサにより障害物を検出する(1)の機能の確認などに成功しており、現在、MARK IVによる総合実験を人間ロボットシステムの立場から進めている。



第2図 盲導犬ロボット(MELDOG MARK IV)による屋外実験

### 3. 問題点と今後の課題

#### 3.1 埋込型

閃光を用いる埋込型視覚補綴の問題点は、1969年ソコゴ大学で開催された第2回視覚補綴会議における以下の議論に尽きるが、そのどれもが未解決のままである。

- (1) 閃光は生物学的に見て、長期的な使用なども含めて安全なものであるかという生物学的問題
- (2) 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か、また、正常の視覚のように刺激像を外界へ再投影できるのかという認識論的問題
- (3) 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、社会的影響はという実際的な問題

特に(2)に関しては、先天盲や早期失明者が開眼手術をした後、視覚概念の形成がなされていないために「見れども見えず」の状態となり大きな戸惑いを覚える現象が報告されている<sup>17)</sup>ことを考えると、たとえ安全な刺激が行われても基本的な疑問が残ることも事実である。聴覚補綴についても先天聾について聴覚というよりは頭の中に振動感覚を生じてしまうという同様の戸惑いを感じた報告もあるが<sup>18)</sup>、視覚補綴に比べればその解決は容易であると思われる。後天聾に対しては、患者のみならず親近者の意見をも合わせ評価する試みが行われており、安全性や自律性の向上のみな

らず、コミュニケーションがスムーズになることからの孤独感や疎外感の減少といった心理的な面での効果も報告されている<sup>19)</sup>。

このように特に聴覚補綴についてはリハビリテーション的な見地からも有効であり、世界的に多くの研究が進展しつつあり、それに伴って用語やデータの標準化を提案する声も出始めている状況にある<sup>20)</sup>。

#### 3.2 感覚代行・補助装置

汎用型の問題点は、いくら柔軟性を仮定しても「皮膚はやはり網膜ではない」という点にある。従って、画像を単にそれと同一の触覚パターンに変換して提示する方式にはおのずから限界がある。

カメラの得た画像をいかにうまく処理して重要な情報を抽出し、それを盲人に提示するかという点に現在の課題は絞られている。例えば、エッジ法と領域法の長所を合わせ利用した方式によるセグメンテーションの利用の検討などがなされ始めている<sup>21)</sup>。

しかし、通常の画像処理の方法が必ずしも皮膚上の提示に同じように有効かどうかは未知数であり、人の皮膚の処理パターンへの反応特性をも考慮しつつ、最適の画像処理法を決定してゆく必要がある。

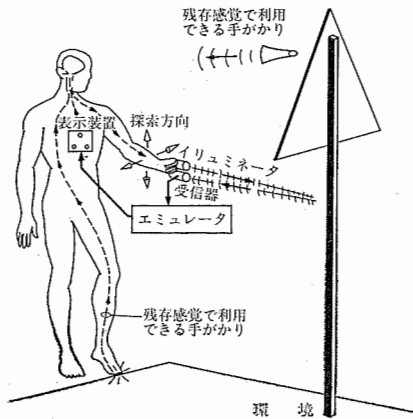
機能分離型の研究は現在では最も臨床応用に近い。従って、その設計、製作、評価の三つの段階を繰り返して最適なものへの努力がなされている。

その場合の最大の問題点の一つに、設計、製作、評価のサイクルタイムが非常に長いということがあげられる。例えば設計、製作、評価に最低1年ずつ、計3年の月日を要してしまい、それが具合が悪い場合にはまた同様のステップを踏み直さなければならない。もう一つの問題点は、障害者の場合特に個人々々の状態が異なり、障害の状態や残存機能の状況、さらには先天、後天も含めた個人の体験や経験が千差万別であることである。従って、万人に共通の補助器はなく、個人々々にあったものが必要となる。レディメードではなくカスタムメードが望ましいわけである。

そのような、個人最適化をはかり、いわば多品種少量生産を、速いサイクルタイムで行うような方式は考えうるであろうか。

Mannは、第3図に示すような、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定量的に評価する人間・機械・環境シミュレータを提案した<sup>22)</sup>。これは、その利用する補助装置を計算機によりエミュレートすることにより、実際に製作し評価する過程の簡素化を実現し、前述のサイクルタイムの大幅な縮小をはかることができるという一つの重要な提案でもあった。

著者らは、簡易型の人間・機械・環境シミュレータを構成し、例えば盲導犬ロボットなどが進むべきコースを知った場合に、その情報をいかなる聴覚信号をもって提示すれば最適であるかを定量的に測定する一方



第3図 R. W. Mann の提案する人間・機械・環境シミュレータ

法を提案し、その方法によれば第二の問題、すなわち個人最適化の設計が割合簡単かつ有効に行えることを報告している<sup>23)</sup>。

#### 4. おわりに

人工感覚器の研究は他の人工臓器の研究開発に比べ遅れているといわざるをえない。これは、一つには医学や医用工学が従来、い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き、慢性的疾患にまで手がまわりかねたことによるといえよう。しかし、それ以上に、感覚補綴は、いわば人の認識過程の根幹にせまるものを、その研究要素に含んでおり、認識機構の生理学的、心理学的そして工学的な解明なくしては本質的には完成できないところに原因があるように思われる。現在、小手先だけの方法論にたよらず、本質的な認識への努力とあわせた感覚補綴に向けての研究の萌芽がみられ、今後の進展が期待される。

#### 参考文献

- 1) 館 暲：感覚補綴・代行システムの現状と将来，計測と制御，20-12，1113/1121 (1981)
- 2) O. Foerster: Beitrage zur Pathophysiologie der Sehbahn und der Sepsphäre, J. Psychol. Neurol. (Leipzig), 39, 463/485 (1929)
- 3) W. Watson: An account of Mr. Benjamin Franklin's treatise, lately published, intitulated, experiments and observations on electricity, made at Philadelphia in America, Philos. Trans. R. Soc. London, 47, 202/211 (1751~52)
- 4) G. S. Brindley et al.: The sensation produced by electrical stimulation of the visual cortex, J. Physiol. (London), 196, 479/493 (1968)
- 5) W. H. Dobbelle et al.: Artificial vision for the blind by electrical stimulation of the visual cortex, Neurosurgery, 5, 521/527 (1979)
- 6) D. K. Eddington et al.: Auditory prostheses re-

- search with multiple channel intracochlear stimulation in man, Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 87, 1/39 (1978)
- 7) I. J. Hochmair-Desoyer et al.: Cochlear prostheses in use, recent comprehension results, Arch. Oto-Rhino-Laryngol. (West Germany), 229-2, 81/98 (1980)
- 8) L. R. Engelman et al.: Results following cochlear implantation and rehabilitation, Laryngoscope (U. S. A.), 91-11, 1821/1833 (1981)
- 9) P. Bach-y-Rita: Brain Mechanisms in Sensory Substitution, Academic Press (1972)
- 10) 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)
- 11) M. M. Uslan et al.: Drop-off detection in the touch technique, J. Visual Impairment and Blindness, 74, 179/182 (1980)
- 12) 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)
- 13) L. W. Farmer: Mobility Devices, Foundations of Orientation and Mobility, American Foundation for the Blind, 357/412 (1980)
- 14) B. A. Goldstein et al.: Acoustic analysis of the Sonic Guide, J. Acoust. Soc. Am., 70-2, 313/320 (1981)
- 15) S. Tachi et al.: Guide Dog Robot—its basic plan and some experiments with MELDOG MARK I, Mechanisms and Machine Theory, 16-1, 21/29 (1981)
- 16) S. Tachi et al.: Electrocutaneous communication in Seeing-eye Robot (MELDOG), Proceedings of 4th Annual Conf. IEEE Eng. in Medicine and Biology, 356/361 (1982)
- 17) 鳥居修晃，他：先天盲における開眼手術後の視覚の構造化，第1回感覚代行シンポジウム論文集，71/81 (1975)
- 18) L. S. Eisenberg: Use of the cochlear implant by the prelingually deaf, Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 91, 62/66 (1982)
- 19) M. Wexler et al.: Psychological effects of cochlear implant: patient and 'index relative' perceptions, 91, 59/61 (1982)
- 20) P. Banfai et al.: Contribution with regard to the standardization of the terminology, the data and the rehabilitation program in cochlear implant research, HNO (West Germany), 30-7, 264/268 (1982)
- 21) T. Pun: Tactile artificial sight: segmentation of images for scene simplification, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-29-4, 293/299 (1982)
- 22) R. W. Mann: The evaluation and simulation of mobility aids for the blind, A. F. B. Research Bulletin, 1/62 (1965)
- 23) S. Tachi et al.: Quantitative comparison of alternative sensory displays for mobility aids for the blind, IEEE Trans. Biomed. Eng., BME-30-9, 571/577 (1983)