

感覚代行研究から人工現実感技術へ

伊福部達

北海道大学電子科学研究所感覚情報研究分野

〒060 札幌市北区北12条西6丁目

感覚代行とは失われたり損なわれた感覚機能を補助代行するために、残された感覚や神経系を通じて情報を中枢へ伝達し本来の正常な感覚に近いイメージや概念を惹起させることを目的としている。一方、人工現実感は周知のように人工的に作った情報でより現実に近い感覚を惹起させることを追究する技術であり、感覚代行が障害者を対象としている点を除けば方法論は同じである。

筆者は25年間にわたり感覚代行の研究に従事してきており、その間、触知ボコーダ、音声タイプライタ、人工内耳、埋め込み型耳鳴り治療器、デジタル補聴器、超音波メガネ、平衡感覚障害補助などの研究を行ってきた。そして、感覚代行研究から脳における感覚統合、概念形成、感覚運動連合などについて多くの知見が得られてきている。

本稿では、筆者が進めてきた感覚代行研究を紹介し、その研究がどのように人工現実感技術に結びついてきたかを述べたい。

From sensory substitute studies to virtual reality technologies

Tohru Ifukube

Laboratory of Sensory Information Engineering, Research Institute for
Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo 060, Japan

The purpose of sensory substitute studies is to create images which are similar to original sensations by transmitting information to central nervous system through the residual senses or the nervous systems in order to aid or substitute the lost or damaged senses. On the other hand, virtual reality is one of technologies to display informations which are similar to real images, and its research approach is almost the same as the sensory substitute studies expect that the sensory substitute devices are used for only by the disable.

We have been carrying out the sensory substitute studies for about 25 years, and have designed a tactile aid, a monosyllabic voice typewriter, a cochlear implant, a tinnitus suppressor, an artificial larynx, a digital hearing aid, ultrasonic eye glasses, and an equilibrium aid. And also, we have got many findings such as sensory integration, concept formation, sensory-motor association in the human brain.

I will refer to our researches regarding the sensory substitutes and mention how the researches have been connected with the virtual reality technologies.

1. 感覚代行研究の方法論

感覚代行とは失われたり損なわれた感覚機能を補助代行するために、残された感覚や神経系を通じて情報を中枢へ伝達し本来の正常な感覚に近いイメージや概念を惹起させることを目的としている。一方、人工現実感とは周知のように人工的に作った情報でより現実に近い感覚を惹起させることを追求する技術であり、感覚代行が障害者を対象としている点を除けば方法論は同じである。

筆者は25年間にわたり感覚代行の研究に従事してきており、その間に以下に述べるような色々な感覚代行機器を開発してきた。残念ながら、その多くは普及しないままであるが、失われたり損なわれた感覚を補助代行する研究から大脳における感覚統合、概念形成、感覚運動連合などについて多くの知見が得られてきている。そして、それらの知見や技術は必然的に人工現実感に関する技術に結びついてきた。

現在のコンピュータやロボットは見たり聴いたり触ったりあるいは平衡を保ったりする機能では障害を持っていると考えることができるので、障害者のための補助代行研究はそのままコンピュータのための人工知覚技術などへ応用されるのである。そして、人工現実感で生まれた種々の技術は再び感覚代行の研究にフィードバックされ、実際に障害者に装置を適用して不十分なところがあれば再び基礎となる心理学や生理学に戻るといった方法論をとることができる。

このような方法論に従って研究を進める分野を福祉工学といい今後大きく発展することが期待されている。いうまでもなく、福祉工学を社会に還元するために一番重要なのは、障害者達の協力や医療関係者との共同研究であり、現場からの発想である。幸い、今年の4月から電子情報通信学会では、筆者が委員長となって、福祉を強く意識した「ヒューマンコミュニケーション基礎研究会」を発足させることができ、また、文部省科研では「人工現実感の基礎的研究」という重点領域研究が認められ、筆者の班長のもとで、人工現実感を評価し福祉へ活かす研究が開始することになった。このように学問的な立場からもこの分野を推進する基盤ができ

つつあり、25年にわたって一つの方法論に従って続けてきた福祉工学にやっと一筋の光が当たったようになってきた。本稿では、筆者が進めてきた研究を中心に感覚代行研究が必然的に人工現実感技術に結びつくことを述べたい。

2. 種々の感覚代行システム

2. 1. 聴覚イメージを惹起させる方式

2.1.1. 触覚を介する方法

聴覚障害といっても内耳内の受容器に障害があつて、中枢へつながる神経が正常に働いている場合がある。そのような人達には、聴神経に直接電気刺激を与え音声情報を中枢へ伝達するという人工内耳という方法が採られることがある。脳の可塑性のおかげで、電気刺激で惹起される音声は最初は雑音に過ぎなかったものが、使っていく内に声に聞こえてくるようである。ただし、人工内耳は重度聴覚障害者の全てに有効な訳ではない。恐らく障害者の20%位に適用できる程度であろう。残りの80%以上の聴覚障害者については他の感覚を代替利用する感覚代行が必要になる。

我々は20年以上も前から、一本の指先に振動子アレイ(16列×3行)を装着し、音声によって振動部位が変わったり、移動したりするのを振動触覚で認識させる触知ボコーダ(図1)の開発を行っている。これは、一応実用に供しているが、未だにその有効性に関する議論が続いている。現在のところ、読話と併用することにより、従来読話だけでは識別の困難であった子音(例えば、/ku/, /su/, /tsu/, /nu/, /fu/, /yu/, /ru/)で触知ボコーダを併用すると22%から70%へ識別率が改善することを実証している。

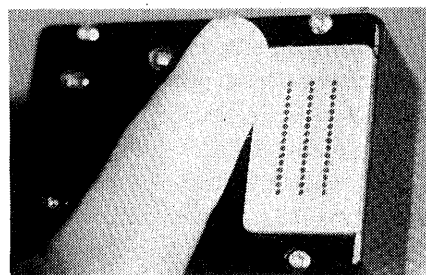


図1 振動子アレイ(16×3)

しかし、幼児に対して効果があるかどうかは未だに結論がでていなく、現在、「母と子の教室」という聴覚障害児のための教育機関で評価に関する研究が進められている。発声訓練のフィードバックを得るのに使ったり、警報音の存在や方向を知るのにも利用できる。現在の技術があれば、一昔の補聴器程の大きさにする事ができるので、触知ボコーダを再評価することは十分意義があろう。

2.1.2. 視覚を介する方法

一方、中途失聴者の場合は触知ボコーダを利用して訓練が大変で、音声言語と振動パターンとが結びつくという保証はない。脳の可塑性を期待しても、触覚情報が言語野に流れ込むのは困難であろう。音声を画像に変換して目で見るといビジュアルスピーチの研究も古くからあり、最近ではカラー画像にして視覚の錯視を積極的に利用して表示するという研究もなされている。視覚は触覚に比べて受容できる情報は圧倒的に多いことから、視覚を利用しようとする試みは自然な発想であろう。しかし、画像により音声概念が惹起されるようになるかは未だに結論が出ておらず、議論の分かれるところである。それよりも、既に獲得している文字によるコミュニケーションを利用した方が有利であろう。すなわち、音声を文字に変換する音声タイプライタが有効な手段となる。しかし、現在のところ、誰が話しても、連続的に話しても、正しく認識して文字に変換する音声タイプライタを実現するには多くの課題を残している。

我々は、15年ほど前に、日本語の特長を活かして、一音一音区切って話した言葉を実時間で仮名文字に変換する装置（図2）を開発して中途失聴者に利用してもらったことがある。話者の音声はあらかじめ登録しなければならないが、96%の精度で音声を0.2秒で文字に変換できる機能を備えていた。

すべての日本語を表示できることから、話し方は不自然になるが、中途失聴者にとってはそれでも十分であり、また、上肢不自由者がワープロを利用するときなどにも活かすことができると考えている。当時はZ80というCPUを用い

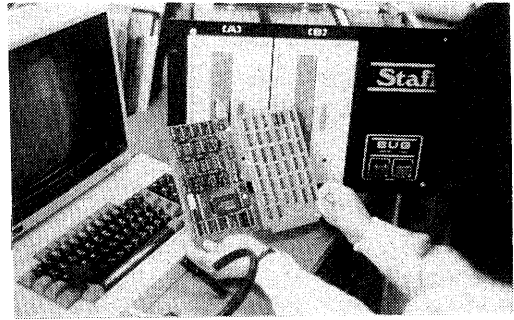


図2 単音節音声タイプライタの外観

てわずか16kWのメモリで実現しており、現在の技術があればポケットに入る程度の大きさにする事ができる。これも、音声を文字というイメージで符号化して伝える手段として再考しても良い時期にきていると考えている。

2.1.3. デジタル補聴器

ところで、高齢者や難聴者に話しかけるとときには我々は無意識で「ゆっくり」「はっきり」話しかけており、彼らもそのように話してくれることを望んでいる。そこで、老人性難聴者のために、日立中央研究所で開発された、音声を「ゆっくり」聞かせる話速変換型デジタル補聴器を我々が評価したことがある。これは、母音部のピッチ波形を繰り返すことで、声の高さを変えずに話速を遅くするものである。実音声に対する遅れは、無発声区間の短縮により減少させている。これは、図3に示したように、

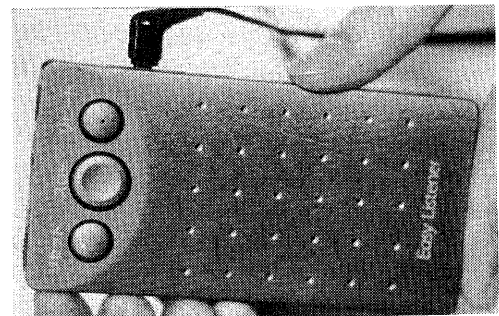


図3 デジタル補聴器の外観

DSPを中心とした装置でシステム手帳サイズの携帯型となっている。老人性難聴者の10耳で話速を1, 1.25, 1.33, 1.5倍に引き伸ばして文

の聞き取り検査を行ったところ文章中の単語の聞き取り誤り率が減少し、聴覚の時間分解能の低い難聴者ほど改善率が高いことが分かっている。

また、日本語には「雨」と「飴」のようにイントネーションだけが異なることによって違った意味を持つ音声がよくある。このイントネーションを強調し、「はっきり」として聞こえるように変換しても、聞き取り率が大きく改善することを見だしている。高齢化すると単に聴力が低下するばかりでなく、時間分解能や言語理解の速度などの低下も見られることから、音声イメージを中枢へ伝達する補聴器の発想を大きく変える必要があろう。

2.1.4. 人工内耳

ところで、もし、人工内耳を介して聴覚中枢へ情報が送られれば、中枢における音の記憶や言語の処理機能を少しでも活かすことができる。このような発想で、前述のように、聴神経を直接電気刺激する研究が古くから進められている。わが国では、1981年に我々がIC技術を利用した16チャンネル双極型の柔らかい刺激電極アレイを開発したのが人工内耳研究の最初である。しかし、当時、わが国では医学部系が関心を示さなかったなどの理由で、筆者が米国スタンフォード大学で8チャンネル型人工内耳を作り音声弁別に関する研究を行ってきている。図4は人工内耳の概念図である。一方、メルボルン大学で開発された22チャンネル型人工内耳は米国コクレア社で製品化され、それが瞬く間に全世界に普及した。

ただし、内耳は導電性のリンパ液で満たされているので、刺激電流が広がってしまい神経を選択的に刺激できないとか、電極アレイを内耳の奥まで挿入するのが難しいという問題点が残されている。我々は現在、3電極を一つの組として、それに供給する電流バランスを制御する方法で、電流分布の尖鋭化と刺激部位をスウィープする機能を持たせ、その有効性を動物実験により確かめている。

人工内耳は幼児にまで適用の範囲を広げており少なからず効果をあげている。しかし、適用

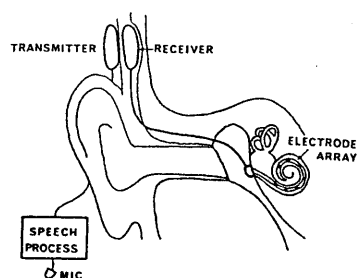


図4 8チャンネル人工内耳の概略図

年齢は、高度難聴または聾であるという確実な診断がつくということから、2才以上としている。さらに、先天聾にはあまり有効でないことも問題となる。先天聾で有効でないのは、音経験がないため人工内耳による電気刺激が単なる雑音としか知覚されないことによる。いくら脳に可塑性があるといってもそれにあまりにも期待しすぎると失敗に終わる。人工内耳で重要なことは、脳の可塑性の限界を明確にし、いかに記憶している音感覚を惹起させるかである。

2.1.5. 耳鳴治療器

ところで、難聴者の5-6割に「耳鳴」が存在し、患者は不眠に悩まされるばかりでなく、話声が遮断されさらに聞こえが悪くなるなどの症状を訴えている。我々は、人工内耳の開発過程で、内耳に電気刺激を与えることにより耳鳴が消失したり抑制されるという現象を確認している。300名を越える患者による電気治療から、30%で一過性であるが耳鳴が消失し、63%で軽減されることが分かった。

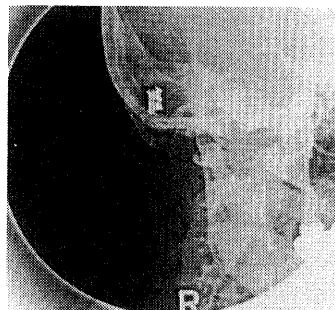


図5 埋込まれた耳鳴治療器のX線写真

そこで、耳鳴が始まったら息者自身で治療できるような埋め込み式耳鳴治療器の開発を行い、現在まで7名の患者に連用している。図5は、患者に埋め込まれた治療器の受信器と電極のX線写真であり、耳掛け式補聴器に組み込んだ送信器から受信器へ電磁波を送るという方法をとっている。この電気治療により言葉の聞き取りが良くなるという効果もあり、聴覚中枢の働きが活性化されている可能性がある。蝸牛の電気刺激により音のイメージが明確になることは興味深い現象である。

2. 2 人工喉頭音声を自然にする方法

喉頭がんなどで喉頭を摘出して声を失い正常な社会生活を送ることが困難になった人達は、何らかの代用発声法で声を表出しなければならない。従来、喉頭を摘出すると、「食道発声法」と呼ばれる代用発声法が利用されるようになる。ただし、問題点は、会話獲得には個人差が大きく練習期間は6か月から一年かかり習得が難しく、できない人達も多いことである。喉頭摘出者は高齢者が多いため、体力消耗などでこの恩恵に浴せない人連が急増している。

そのため修得が容易であるということから電気人工喉頭という器具を利用する方法が最近使われるようになってきた。しかし、これらはイントネーションやアクセントが出しにくいいため、ブザー音的でその音声は極めて不自然でありヒトの声のように聞こえないという問題点がある。我々はこの電気人工喉頭に着目し、習得が容易な電気人工喉頭にイントネーションやアクセントを自然に付加できるような方式を考案し、約10年にわたる研究を基礎として実用器を試作している。

そのヒントとなったのは、九官鳥の発声機構の研究にある。九官鳥音声のスペクトルはヒトとは異なるのに、ヒトの声のように自然に聞こえる仕組みを調べた研究である。結論から言うと、九官鳥はヒトの声のイントネーションを忠実に真似して、ヒトの聴覚をだましていうことである。ところで呼吸は健常者の発声においてアクセント、リズムなどを作りだし、イントネーションの制御にもかかわっており、発

声の制御に重要な役割を果たしている。我々の人工喉頭では、この呼吸の優れた発声の制御機能を利用しており呼気でイントネーションを制御できるように工夫している。

本機器は、図6に示したように、呼気圧検出部、呼気圧一ピッチ周波数変換部、およびバイブレータ部が一体化したものからなる。センサ部（下の黒い円形）を気管孔と呼ばれる喉に孔を開けたところに設置し、息者が片手でバイブレータ（上の白い円形）を喉にあてて自然な呼吸を行うと、呼気時にバイブレータが振動しイントネーションのついた自然な音声生成される。これは音声の自然性を決定する要素を探る研究に発展している。

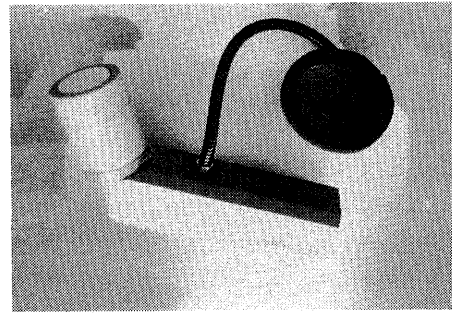


図6 呼気によるピッチ制御型人工喉頭

2.3 盲人のための音による環境情報の呈示法

2.3.1. 超音波眼鏡

九官鳥の特殊能力と並び称されるものに、自ら発射した超音波の反射音で環境を認知できるコウモリがいる。我々は、このコウモリの発声音が障害物や餌を発見するのに有利なのではないかと考え、コウモリと同じ音を出して反射音を耳に聞こえるようにした超音波眼鏡を開発したことがある。コウモリには、一定周波数（CF）の後に一寸だけ周波数が下降（FM）するCF-FMコウモリと、超音波の周波数がいきなり80kHzから40kHzへ1msへ変化するFMコウモリに分かれる。

最初にCF-FMコウモリをモデルとして、発射音と反射音のビート音を聞くような超音波眼鏡を開発（図7）し、被験者にどの程度の障害物が検出できるかを試したことがある。その

結果、距離、左右差、および物体の動きの速さなどが弁別できるが、静止物体の弁別が悪いことが分かった。

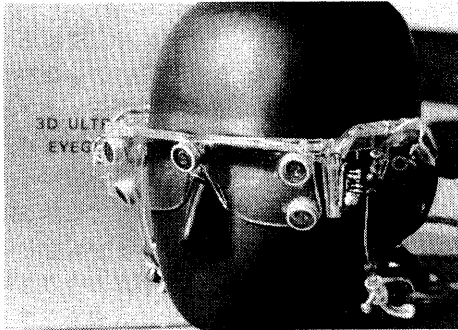


図7 CF-FMコウモリ型超音波眼鏡

次に、FMコウモリをモデルとして、反射音を50倍にスローモーションにして可聴域に変換するものを開発(図8)した。この装置を使って、障害物の検出能力を調べたところ、直径2mmのボールであれば92cmのところで見ることができることが分かった。一方、CF音で同様の実験を行ったところ、2mmのボールは62cmまで来ないと見つからなかった。これらのことからFMコウモリをモデルとする方法が環境イメージを把握しやすいことが分かった。

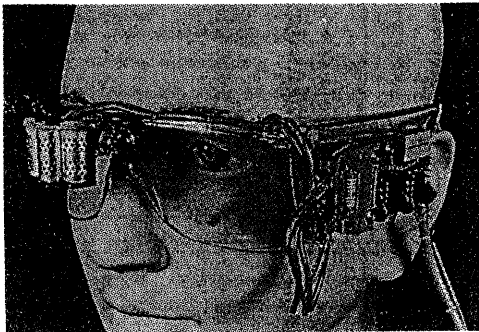


図8 FMコウモリ型超音波眼鏡

2.3.2. 盲人の障害物知覚

ところで、盲人の多くはこのような装置が無くともある程度の障害物を知覚することができることが分かっている。我々は、このメカニズムを調べ超音波眼鏡に活かすことができないか

ということで盲学校の協力で障害物知覚の解明研究が始まった。その結果を要約すると、盲人が障害物に向かって歩いた場合、数m離れたところでは足音などの反射音を手がかりにしていることが分り過去の研究の結果と一致した。しかし、図9に示したように、3m付近に来ると何かがあるような感じがするという。この要因を調べた結果、反射音像が直接音の方へ移動するという先行音効果により、音像の移動が何かがあるという感覚と結び付いていることが推察された。

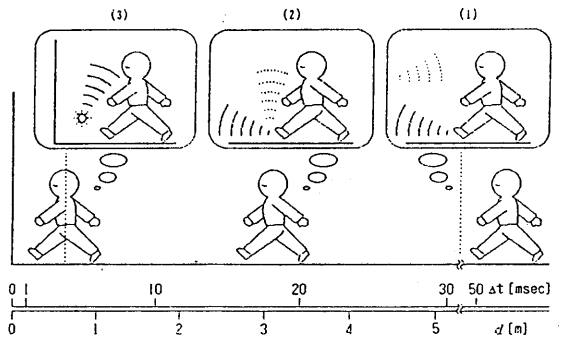


図9 盲人の障害物知覚の過程

次に、足音がでないようにし、障害物の板(50cm×50cm)の後ろに環境雑音を発生させるという状況を作り、障害物に向かって歩かせた結果と、その時の音圧強度および両耳に到達する音波形の相関係数を求めた。その結果、3人の盲人は約38cmのところ確実に障害物を発見することが確認された。そのときの音圧変化を見ると、約1m位から減少し始め、また、両耳相関係数は40cm位のところで急に減少している。両耳相関係数はその値が小さいほど、音像が広がっていることに対応していることから、盲人には障害物が直前に来ると、弱い音像が全面に広がったような感じになり、それがぶつかりそうになるという内観報告に対応していることが想像された。

さらに、盲人と板(50cm×50cm)ともに静止している状況で50cm離れたところでの障害物知覚能力があるかを調べた結果、横向きではほぼ100%、正面では95%の精度で知覚できることが分かった。そのときの盲人の耳の位

置における音のスペクトル（音響伝達関数）を求めると図10のようになり、スペクトルに多数のディップが見られ、そのディップの密度が距離に依存しているのが観測された。これは、直接音と反射音の位相干渉によってできたもので、カラーレーションと呼ばれる。実際、2個のスピーカを盲人の左右に置いて、一方からは直接音、他方からは反射音を呈示させると、直接音と反射音の時間差に伴い仮想障害物の距離が明瞭に変わった。このように、音像の制御に

さらに、現在は140度の視野のあるHMDを作ったり、ずれ覚や圧覚などを呈示できる触覚ディスプレイや水素吸蔵合金アクチュエータを利用した力覚ディスプレイの研究開発が進められている。感覚代行研究はこのように必然的に人工現実感の研究に結びついてきている。そして、誰もが使える人工現実感技術が進歩すれば、その一部を再び感覚代行装置へフィードバックでき、感覚系障害者のための真に役にたつ福祉機器の開発へつながるのである。

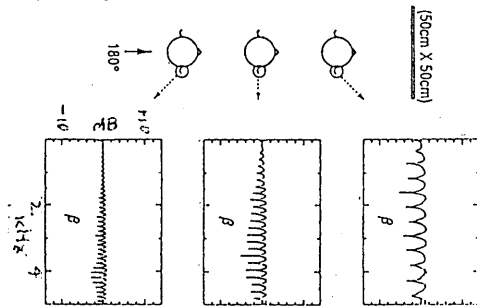


図10 カラーレーションによる障害物知覚

より仮想障害物を作り出せることが証明でき、このことから人工現実感への道が拓かれていった。

3. 人工現実感研究への発展

そこで、図11に示したような人工現実感システムを開発し、音像の制御だけでなくHMD、回転椅子、傾斜椅子、および身体運動を計測する機能を持たせた。詳細は省略するが、移動音源と回転刺激や傾斜刺激には強い相関があり、空間認知の制御が移動音像で行えることが分かってきた。

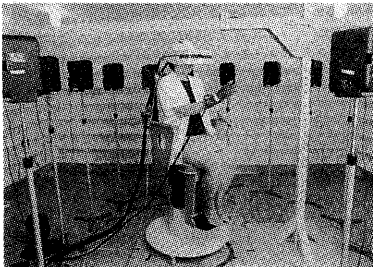


図11 人工現実感システム