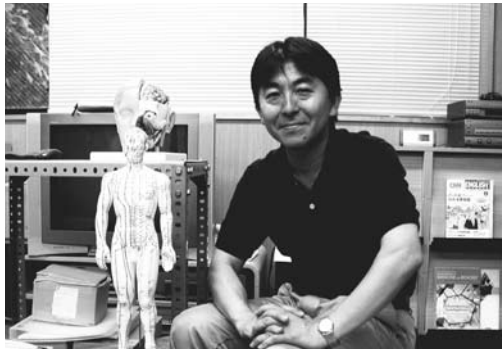




# 機械と人体をつなぐ技術

## 八木 透 研究室～情報環境学専攻



八木 透 准教授

人は自身の体だけではなし得ない作業を機械に行わせることで発展を遂げた。そして今、人は自身の体を機械で補う技術を研究している。また、人は機械を作ったが、機械は必ずしも人の思うように動いているわけではない。人はより理想的な機械操作を実現できるはずである。

この二つのテーマを解決するのが、八木研究室で行われた、神経という電気的かつ生体的な回路と機械を融合させるための神経インタフェースの研究だ。八木先生に医用生体工学の成果と今後の行方を伺った。



### 神経インタフェースとその分類

考えるだけで機械を動かす。失われた体の機能を機械で補う。このような技術は、例えばサイボーグ技術と表現され、昔から機械技術の夢の一つであった。その中でも、生体の神経系と機械との間で情報伝達を行う技術のことを神経インタフェースという。

神経インタフェースは、機械と肉体のどちらが情報を入力する側かによって二つに分類される。一つは出力型、あるいは記録型と呼ばれる、体内信号から機械への情報出力を記録し利用するものである。簡単に言えば、肉体からの信号を機械で読み取り、別の機械の操作に利用する技術だ。実用化されている例としては、筋電を利用した義手が挙げられる。これは装着者が腕を動かそうとすると、義手が腕の神経の活動を読み取り動作するというものだ。もう一つは入力型、あるいは刺激型と呼ばれる、機械から肉体へ人工的な信号を入力し利用するものである。これは、感覚器の代わりに設置した機械が必要な情報を得て生体の信号に変換し、神経を刺激し感覚を補うという技術だ。人工の聴覚や視覚がこれにあたる。

また、機械と肉体をつなぐ際に、その機械を体

の中に埋め込むか外に設置するかで分類されることもある。機械を体の中に埋め込むものはインプラント型と呼ばれる。体内に機械を埋め込んだり脳に電極を差し込んだりすることで、神経に直接干渉することができるものだ。心臓のペースメーカーはその一例にあたる。一方、機械が体外にあるものはノンインプラント型と呼ばれる。例えば脈を測る際に心臓を取り出す必要がないように、肉体の外部から体内信号を計測することが可能なものだ。このノンインプラント型には、頭皮に電極を貼って脳波を読み取る装置や、後に挙げる近赤外分光法などがある。

八木研究室では、神経インタフェース工学を研究している。ここからは、その中でも人工視覚や脳に関するものについて紹介する。

#### 機器を埋め込むか否かによる分類

インプラント型 ノンインプラント型

情報の 出入口に よる分類	出力型 (記録型)	視点入力装置 節電義手
	入力型 (刺激型)	人工視覚 心臓の ペースメーカー



## 改良される人工視覚

人工視覚とは、失われた視覚を機械による刺激で補うための機器のことである。通常、生物は目の水晶体から取り込んだ光を網膜で電気信号に変換し、脳に送ることで視覚を得ている。角膜や水晶体に異常がある場合に神経インターフェースで直接電気刺激を網膜に与え視覚を復活させるのが、八木研究室の開発した人工視覚の仕組みだ。これはインプラント型かつ神経刺激型のインターフェースと分類できる。

人工視覚を実現するための方式はさまざまであるが、八木研究室のものは、カメラと送信装置を兼ねた体外機器、受信装置と神経を電気刺激する装置を兼ねた体内機器の二つから成り立つ。体外機器に備え付けられたカメラから得た画像を電気信号に変換し、体内機器に送信する。そのデータを受信した体内機器が、電極から神経に電気を流す(図1)。こうして装着者は擬似的な視覚を得られるのだ。

八木研究室の人工視覚は電極を網膜のそばに設置し、網膜を電気で刺激する方式だ(図2)。電磁誘導から得た電力で電気パルスを生成し、白金の刺激電極から放ち網膜を刺激するのである。この機器で動物実験を行ったところ、人工視覚で網膜を刺激されたネズミの脳は、健康なネズミが物を見た場合と同じ脳波を発した。これは、この機器がヒトにも効果があることを示している。

しかし、網膜を刺激するタイプの人工視覚には

いくつかの欠点がある。まず、網膜が機能を失っている場合はこのタイプの人工視覚を使うことはできない。網膜は一度損傷すると変質して回復しなくなるため、電気刺激が効果を成さないからだ。

また、機能の集積化にも制限がある。インプラント型インターフェースという性質上、網膜に電気を送るときには電気が電解質を含んだ体液を通ることになる。そのため大きな電気を面積の小さい電極に流すと電気分解が起こり、生体にダメージを与えてしまう。本来神経を通っている電気信号は細胞の膜内外のイオン濃度変化を介した信号伝達であるため、こうした現象を起こさない。ところが人工視覚では電気を流す以外に神経を刺激する方法がないため、面積の大きい電極に電気を流すことで電気分解の発生を抑える必要がある。すると面積を大きくした代償として電極の数を増やせなくなるのである。例えば視覚の神経は光の三原色に対応した三種類の細胞からなっているが、それら一つ一つを区別しながら刺激するような細かくて大量の電極は上記の理由から使用できないため、白黒で荒い画像しか得られないのだ。

さらに、眼の中という厳しい環境も問題となる。これは人工視覚に限らず、インプラント型の神経インターフェース全般に言えることだが、体内に機器を入れるということは、体液に精密機器を入れるということだ。この環境は機器をひどく傷める上に、人体にとっても致命的な影響を与える。体

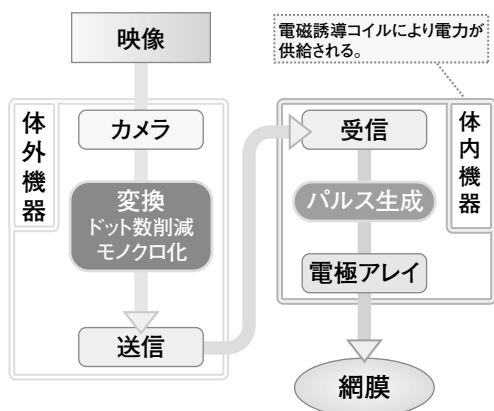


図1 人工視覚の処理の流れ

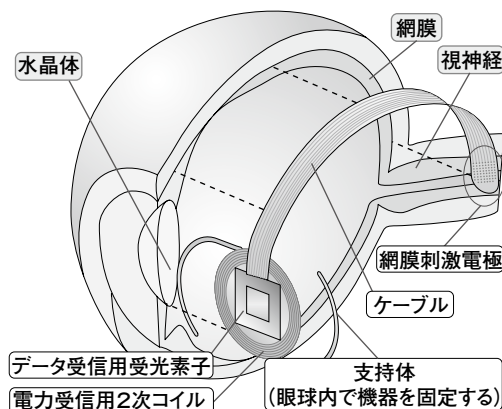


図2 人工視覚の構造

液は生体の一部であるため、装置から溶け出した物質が人体に害を与える可能性があるのだ。よって機器の材質選びの際には人体との反応性の低さが最も強く求められるのである。また、機器は同時に機能性も満たさなくてはならないため、機器に使える材質は非常に限られてしまう。八木研究室ではこの問題を克服するために金やチタンなどの反応性の低い金属を使ってきたが、それでも動物実験の結果、生体の中ではでは三ヶ月ももたないことが判明している。

このように、八木研究室で開発された網膜刺激型の人工視覚には欠点が多い。さらに、アメリカで実験された脳刺激型の人工視覚はこの網膜刺激型の欠点を克服したため、八木先生は網膜刺激型の人工視覚は将来性に欠けると考えている。

脳刺激型の人工視覚とは、網膜ではなく脳の視覚野を電気パルスで刺激することで視覚を作り出す機器である。眼球内に機器を固定する場合は眼球の破裂に気をつける必要があるが、脳ならば機器をピンで容易に固定できるため、機器を埋め込むのに都合がいい。また、脳の視覚をつかさどる部位はクレジットカードほどの面積を持ち、電極をある程度大きくしても数を減らさずに済むのである。実験では八木先生の人工視覚が3×3ドットに過ぎなかったのに対し、脳刺激型は面積にして十倍以上である10×10ドットの光点を作ることができた。これは目の前にかざした手の輪郭がぼんやり見える程度である。しかし、脳刺激型は網膜刺激型より安定するものの刺激に電極を用いることに変わりはなく、生体と完全には融合できない。そのため、電極がずれたり剥がれたりすることで簡単に故障するという欠点があるのだ。

そこで、八木研究室ではより良い人工視覚を実現するため、機械と生体組織を融合させたバイオハイブリッド型の人工視覚の開発を次の研究目標としている。バイオハイブリッド型とは、基盤に神経細胞を培養し、人為的に神経細胞が軸索を伸ばす方向をコントロールしてやることで、既存の視覚系の神経と基盤を直接融合させるというものである(図3)。この方式は、基盤に融合させた神経細胞の軸索を電気パルスの伝導ケーブルとして使うため、網膜の状態に影響されない。また、神経細胞と基盤との間がずれることがないため、電極からの伝達が確実である。

さらに、八木先生の共同研究者は視神経自体がダメージを受けた場合の対処法を開発した。動物実験の結果、本来の視神経の代わりに足から移植した神経をバイパス的に接続しても、光に対する反応を失わないことを確認できたのだ。体のどこかから移植してきた神経を電極アレイの神経細胞と接続することで、視神経の異常をも克服できるのである。

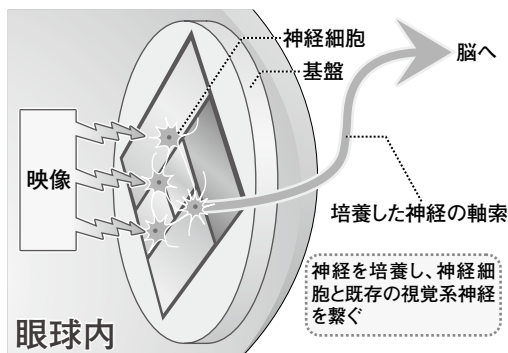


図3 ハイブリッド型の構造



## 生体活動の計測技術及びその応用

八木研究室では、人工視覚の研究の過程で人の眼球運動の計測も行われた。その際、運動の計測技術を工学的に転用して開発したものが視線入力装置である。

視線入力装置とは、人の視線の変化を読み取りその位置情報を他の機器に入力するものだ。この装置は、体をほとんど動かさず声や手話などのコミュニケーションを行えない患者に用いられることが多く、主に病院で利用されている。

一般的な視線入力装置は、ビデオカメラで眼球の動きを記録し画像から視線を割り出すものだ。これらは装置自体が大掛かりで複雑な上、高価であることが多い。一方、八木先生の開発した視線入力装置は、電極をこめかみとおでこに張り付けるだけの非常にシンプルな構造だ(図4)。この装置を付けると、眼球を動かすことで他に指一本動かすことなく電子機器を操作することができるのである。

なぜ、この単純な構造で眼球運動を簡単に読み出せるのだろうか。眼球にはマイナスに帯電している網膜と、その反対側にプラスに帯電している角膜がある。これらは1つの双極子と見なすことができ、動けば当然電場も変化する。この変化を電極で捉えれば、外部から簡単に眼球の動きを読み取ることができるのだ。

この装置は、その手堅い機能性と簡便さ、また安価であることから強い支持を受けている。それまで意思を伝えることすら困難であった患者であっても、介助無しでナースコールを押したり、あらかじめ装置にコマンドを設定しておくことでパソコンを操作することも可能となるのだ。

この他にも、人の眼球運動の際の脳血流や脳波を計測することで、運動を脳の働きから捉える実験が行われた。

まず、実験参加者の左右にライトを設置する。次に、純粋に眼を動かす際の反応のみを知るために実験参加者に何も知らせずに、左右どちらかのライトを点灯する。当然実験参加者はその方向に目を動かす。ライトをつけた瞬間からの脳の働きを時系列で追ったものが図5である。左端はライトを点灯していない時の実験参加者の脳の状態である。この図の色が濃くなっている部分は脳の働きが活発になっていることを表している。図を見ると、ライトが点灯した時刻から150ミリ秒の段階で脳の左側に変化が生じ、それから50ミリ秒経ってようやく目が動いている。この結果から、脳の反応と体の動きには50ミリ秒以上の差が生じていることがわかる。また、光っている方向によって違う部位が反応していることも、実験から

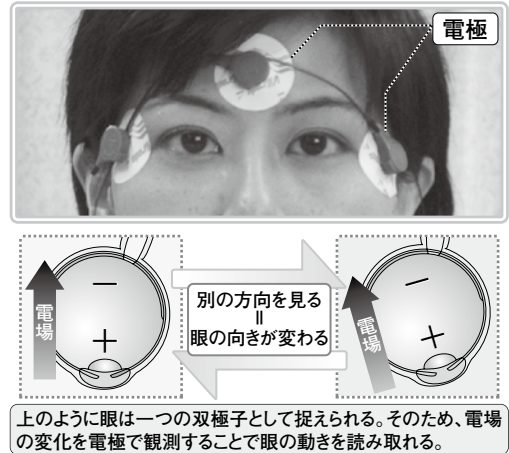


図4 視点入力装置

わかっている。この実験結果は、脳の特定部位を観測することで50ミリ秒後の動作をある程度予測可能であることを意味している。

八木先生はこの技術を応用して、コンピュータとそれを動かす人間との間の溝を埋められないかと考えている。航空機の管制のような複雑なシステムを人間が運用する際には、コンピュータのサポートに従った操作をすることが多い。しかし、コンピュータの指示通りの操作を行わないこと(コンフリクト)によってコンピュータによる予測が不可能な状態になってしまった場合、機械は停止するどころか誤動作を起こすことがある。実際に1994年には、自動操縦装置と機長との間のコンフリクトによりエアバスの墜落事故が起きている。自動操縦装置が機首を上げようとしたのに対し、機長は着陸しようとしたのだ。もし、脳波による動作予測を自動操縦装置に組み合わせ、指

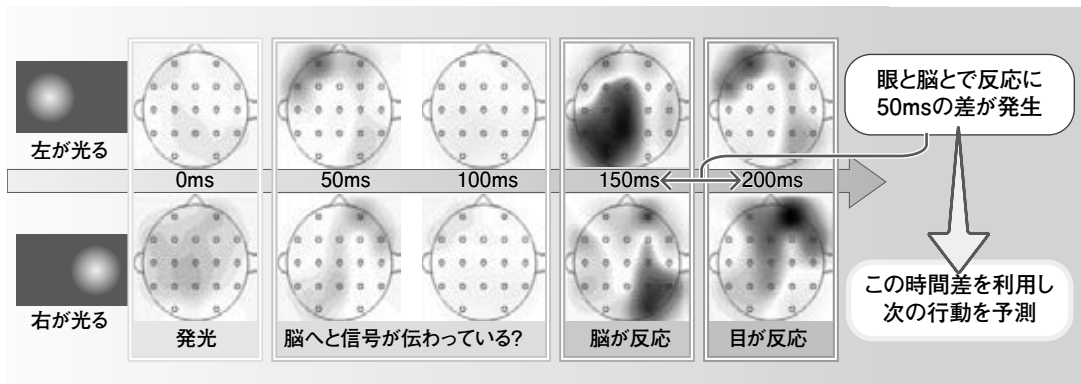


図5 脳波による行動予想



示に反する操作を直前に無効にするシステムを確立できれば、コンフリクトの発生を防ぐことができる可能性がある。

以上の眼球運動や脳の反応に関する実験は、実験参加者の脳波を計測するものだった。同時に、八木研究室では近赤外分光法 (Near Infra-Red Spectroscopy, NIRS) と呼ばれる方法を用いて、感性と脳の働きの関連性も研究している。

近赤外分光法とは、脳の働きを赤外線の反射で読み取る比較的新しいシステムである。脳は活性化しているとき、酸素を大量に消費する。血中の酸素濃度によって赤外線を照射したときの反射率が変化するという現象を利用し、頭の外側から脳に赤外線を当て反射光から酸素の消費量を計測す

れば、脳のどこが活発に働いているのかを調べることが可能となる。この近赤外分光法は、脳波を計測する場合と比較すると、電磁波を遮るシールドルームのような大掛かりな装置を必要とせず、振動のようなノイズにも強いいため、日常における脳の働きを計測するのに適しているのだ。

八木研究室ではこの装置を使い、実験参加者に暗算やしりとりなどを行わせたときの脳の働き方を観察している。最終的な目的は人の感性を客観的に評価することだ。好き、嫌いといった人の感性は個人によって基準が異なり、正確に数値化することが困難である。しかし、それを数値化して評価することができるになれば、製品の評価に客観的な指標を設けることが可能となるのだ。



## 医用生体工学の展望

このように八木研究室では人体と機械の懸け橋となる研究を行っている。八木先生は最後に、日本の医用生体工学技術が未発達であることへの懸念を語った。

現代の医療は工学なしには成り立たない。東京工業大学では医学部が存在しないためその実感が湧きにくいかもしれない。しかし、実際の医療現場には、血圧計を始め放射線治療器具やMRIなど医学の範囲を超えた装置があふれており、医療における工学の重要性がうかがわれる。日本の工学技術そのものは世界最先端のレベルに十分達しているが、医用生体工学の研究は医療現場のニーズに反してほとんど進んでいないのが現実だ。例えば、心臓のペースメーカーは国産品が存在せず、全てが輸入品である。日本が大きなシェアを取っているジャンルは内視鏡（7割以上）のみであり、

その他は比べるまでもない。

もちろん、日本のメーカーの技術があれば純国産のインプラント型の医療機器を開発することも不可能ではない。それにも関わらず研究開発に対して及び腰になっているのは、万が一医療事故を起こした場合の信用問題や賠償問題などを強く警戒しているからだ。現時点では、もし日本の学生が治療用の医療機器を開発したいのなら、海外に行くのが現実的だろう、というのが八木先生の考えである。

しかし、人工視覚の研究からもわかるように、医療と工学はこれからますます結びつきを強めていくことが予想される。日本の工業が世界的な競争力を身につけていく上で、医療機器開発は無視できないものになる。日本の企業が積極的に開発に乗り出せる環境が整うことを期待したい。

「一般の人が気軽に使えるヒューマンインタフェースであるためには、技術者は技術至上主義に溺れず、利用者のことを考えながら開発に臨まなければならない。」紙面の都合上、記事には載せられませんでした。今回の取材の中で先生はこのようにおっしゃいました。この言葉は、医用工学に限らず多くの工学系技術者（及びそれを目指す学生）が、常に頭の片隅に置いておかなければならない原則であると感じています。

今回の取材にあたり、先生は医用工学、特に医療に関する知識がない私たちにも理解がしやすいよう専門用語を一つ一つ丁寧に解説してくださいました。また、理解を助ける図書を紹介してくださいなど多大な協力をいただきました。

お忙しい中、たび重なる取材に快く応じていただき、記事作成に際して多くの助言をしていただいた先生に厚く御礼申し上げます。

(浅見 立志)