Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, Vol. 8, No. 2 （ 1984 ）

展　望

義肢の感覚フィードバック装置

川 村 次 郎*

はじめに

われわれが最初の感覚フィードバック装置（以下感覚装置と略）を試作したのは1965年の秋で、前腕能動義手の把握力を音量の変化として耳へ伝達するものであった（図1）。試作した動機は「人間の手足に感覚があるのだから、義肢にも必要であろう」とごく単純なもので、当時はわれわれも若かったから、このような感覚装置がすぐにも実用化すると考えていた。1977年からは対象を義手から義足に移したが、現在まで約20年間にわたって義肢の感覚装置に関する基礎的および臨床的研究に携ってきたことになる。しかしいまだに実用的な感覚装置は完成していないし、むしろ研究をすればするほど実用化の時期は遠ざかっていくようにすら感じられる。

世界的に見ても義肢の感覚装置で製品化されたものはなく、ようやく数人の切断者の日常生活に使用した程度の報告があるのみである。義肢の感覚装置に関する文献的紹介はすでに行ったので[4]本稿では主としてわれわれ自身の経験[1)~6)]に基づいた、「体験的感覚フィードバック装置論」を述べたいと思う。

1. 現代義肢には感覚装置は何故ついていないのか。

現代の義手や義足には感覚装置は備えられていないが、切断者の日常生活に実用的に使用されているのは事実である。感覚装置なしに従来の義肢が使用できる根拠として考えられるものは以下の3点である。

① ソケットやハーネスを介する感覚フィードバックが存在すること。

② 現用義肢では能動的に動くところがひじょうに少い（まったくないものも多い）から、ソケットやハーネスからの貧弱なフィードバックによっても義肢の操作が一応可能であること。

③ 視覚によるフィードバックが利用できること。

すなわち現用義肢は運動装置そのものがひじょうに原始的であり、このような運動装置の制御には高度な感覚フィードバックは必要としないことと、生体内を通過する感覚情報以外に視覚（ときには聴覚）による情報を利用すれば、特別な感覚装置がなくても義肢の操作は一応可能だからである。

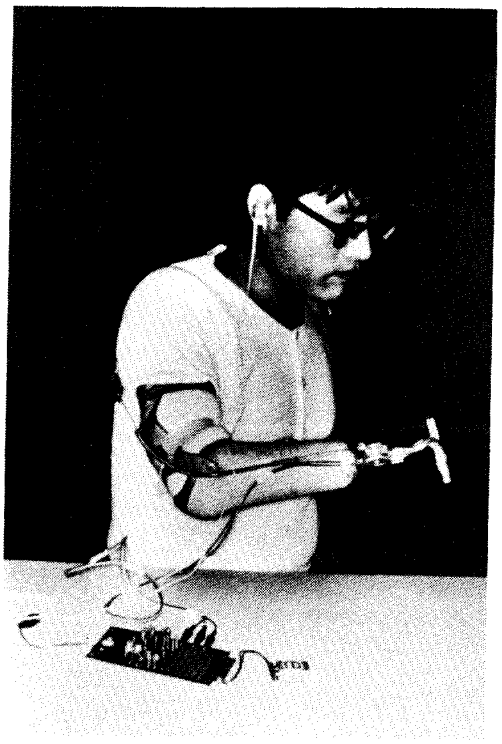


図1　聴覚に伝達する最初の感覚装置

2. 感覚装置は何故必要となるか。

整形外科の一分野である手の外科の専門家の常識のひとつに、「感覚のない手は運動機能を再建しても実用的な手にはならない」というものがある。感覚と運動の両者が失われた手で運動のみを回復させても、患者はその手を実際の動作には使おう

昭和59年2月16日受付
＊大阪労災病院・リハビリテーション科
〒591　堺市長曽根町1179−3

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

としない。正常の手でも対象物を摑むまでは視覚に頼っているが、いったん摑んでしまえば、落さないように保持したり、使いやすい位置に対象物を持ちかえるのは感覚の役目である。感覚のない手では対象物を摑んだのちも絶えず視覚による監視が必要になり、そのうえ切り傷や熱傷などの外傷もうけやすいので、もう一方の手が正常であればついそちらを使ってしまうのである。

義肢の動力化が進み、多数の関節が自由自在に動く義肢が製作されても、感覚装置が備えられなければ、義肢の制御に要する切断者の負担は大きくなり、実際生活での使用は困難であろう。感覚装置と高度な運動機能を備えた動力義肢が完成されれば、現在まったく義手は使わないか、装飾義手のみを用いている多くの片側上肢切断者も、義肢を使用するようになるであろう。

3. 義肢にはどのような感覚が必要か。

義足の足底に検出器をおいた感覚装置は、義足と地面の接触状態の情報を切断者にフィードバックできたが、実際の歩行においては明らかな効果を見出すことはできなかった。足底の感覚は切断者に安心感を与えることはできても、義足が地面に接触してしまってからの情報では義足を制御するためには遅すぎるのである(図2)。

義手の一方の鉤に豆電球を、他方に光電トランジスタを埋めこんだ感覚装置は、鉤の間に対象物が入ったことをいち早く切断者に知らせることができ、実験室内の動作テストでは効果が認められた(図3)。しかし切断者のこの装置に対する評価は低かった。たとえ機能的には便利になるものでも正常の感覚からかけ離れすぎた感覚は、自分の手として使用する切断者に拒絶反応をひきおこすようである。

ON−OFF制御の動力義手に把握力の感覚装置を附加してタバコの把握テストを行ったところ、タバコを適当な把握力で摑むことは困難であったが、制御方法を比例制御に変更した場合には可能になった。把握力の微妙な調節が困難なON−OFF制御義手には、把握力の感覚装置は効果を発揮できなかった。

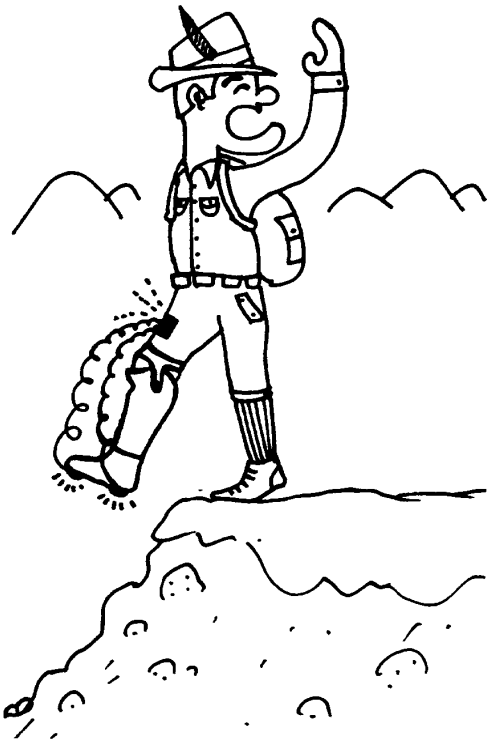


図2　義肢の感覚は切断者が制御に利用できるものでなければならない(林氏による)

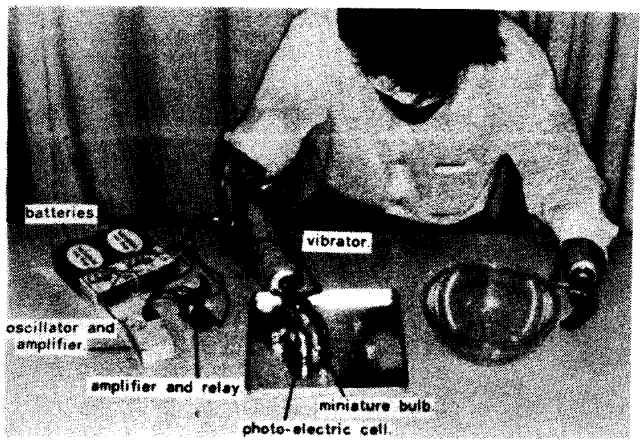


図3　光電効果を利用した感覚装置

人間の手足にある感覚のすべての種類と分布を義肢に備えることはまず不可能に近いから、義肢に適する感覚の種類と分布に順位をつけることが必要である。必要度の高さは必ずしも人間の場合の重要度とは同じでなく、義肢の運動装置の制御能力などを考慮して選ばなければならないが、たとえ性能を向上できる感覚であっても、通常の感覚からかけ離れすぎて切断者に異和感を与えるものは義肢の感覚としては適していない。

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

4. 感覚をどうして検出するか。

義足の足底に圧検出器を配置したように、対象に接する部位に検出器を置くと、検出感度を高くしようとすると壊れやすくなり、温度変化などの検出目的以外の影響も大きく受けることになる。数gの力でタバコを把持したことを感ずる検出器が、数10kgの力にも耐えることは難しいことである。手袋や靴をはいたときに、常に圧を検出しつづけることも義肢の感覚としては欠点になる。

義手の鉤の根元や、義足の下腿の支柱部分にストレインゲージを貼って、対象物から離れて力を検出すれば上記の欠点は除かれるが、どの部位で対象物に接触したかは不明であり、接触した部位によって検出感度が異る欠点も有する。 一般に用いられているストレインゲージは消費電力が大きく、出力電圧が低いことも、義肢に用いるには問題が多い。

人間の指先のように柔らかくて、敏感であり、しかも数10kgの力を受けても破損しない極小型の検出器が義肢には必要である。

5. 情報を人体に如何に伝達するか。

人体への情報伝達は感覚装置実用化の最大の難関である。われわれの研究経過においても、最適の情報伝達方法を求めるために大部分の努力が費やされた。

最初に試みた方法はすでに述べたごとく、耳に音として伝えるものであった。耳は敏感な感覚器官であり、可聴周波数範囲が広く、音の振巾や波形の微妙な変化などを判別できるから、簡単な装置でも大量の情報を伝えることができる。しかし日常生活に不可欠な聴覚を利用するこの方法は、実験室内での使用に限られ、実用化することはできない。耳を利用するもうひとつの欠点は情報の経路がひとつに限られることで、多数の情報源を有する義肢の情報伝達には適していない。

聴覚の代りに皮膚感覚を情報伝達の相手に選べば、日常生活を妨げるおそれもなく、皮膚は面積が広いから情報伝達の経路も多数を確保できると考えられた。義手の感覚装置では皮膚に機械的振動を加える方法を用いた(図4)。 機械的振動の

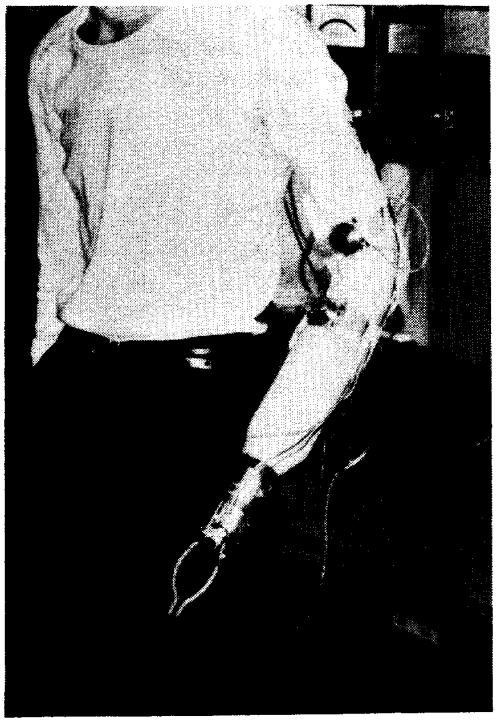


図4 機械的振動を用いる感覚装置

長所は不快感のないことで、そのため振巾を相当大きく変化させることが可能であった。短所は振動子の大きさと重量、振動子を駆動するための大出力の増巾器、周波数は高くなると振動子から雑音を発するため200Hz以下の正弦波に制限されることであった。

義足の感覚装置では装置全体が簡単で良い表面電気刺激を用いた。電気刺激では不快感を如何に減らせるかが大命題になり、刺激強度は閾値を大きく越えることはできず、実際上 ON－OFF 信号を伝達するのが限度であり、周波数も100Hz以下に制限された。1対の電極から伝達できる情報量の少なさを克服するため多数の電極を用いることとし、刺激部位の局在性を高めるために各電極対間を電気的に分離することを考案したり、Lymanらの参考電極を追試した。しかし歩行中の義足の変化は案外早く、100Hz程度の周波数では義足の動きに追随することは困難であった。歩行は手の操作と異なり一定のリズムを持っているから、意図的にゆっくり動かすことは困難である。

皮膚表面の2ヶ所以上に機械的振動や電気刺激を加えると感覚の投写またはphantom sensationと呼ばれる現象を生じ、空間の1点に刺激を感じ

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

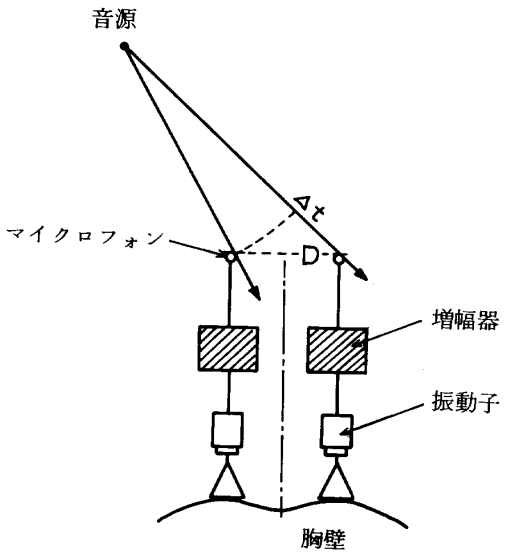


図5　空間に振動感覚を感じるための装置
(Bekesy：感覚と抑制、医学書院、1969)

る(図5)。この現象は断端を刺激することによっても指先や足底の刺激として感じる可能性を示し、義肢の感覚装置には一面好都合なものであるが、反面、振動子や電極数を増加させても人体には1個所の刺激として感じられる可能性をも意味し、皮膚の広さを利用して情報伝達の経路を増加させる方法の理論的根拠を奪うものである。

人体への情報伝達手段としては音のように日常生活に不可欠な感覚器官を使用するものは不適当であるが、機械的振動や表面電気刺激のように皮膚感覚を介するものも絶対的な情報量が不足し義肢の感覚装置には適さない。さらに聴覚や皮膚感覚を介するものはいずれも、通常の感覚とはまったく異なった刺激として切断者に伝達されることも大きな欠点である。これらの問題点を根本的に解決するためには求心性神経を直接刺激することがどうしても必要であると考えられる。しかし末梢神経の直接電気刺激は、複数経路の結合や皮膚貫通部の感染防止の技術が未完成であり、現時点で直ちに臨床的に用いることはできない。

6. そのほかの必要条件

臨床試験で義手の感覚装置を使用した切断者らは、感覚装置の利点を認めながらも、引続き感覚装置を使用することは希望しなかった。その理由

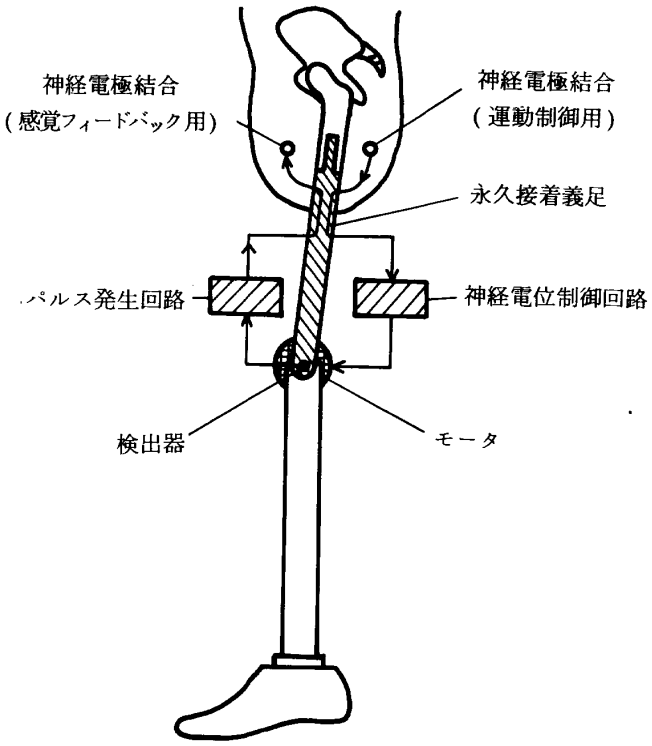


図6　感覚装置を備えた永久接着式
動力義肢の想像図

として、従来の義手と比べて着脱が面倒なこと、耐久性に不安があること、重くなったことなどを挙げた。感覚装置が実用化されるためにはChildressら(Childress, D.S. & Billock, J.N., Bull. Prosth. Res., BPR 10－14:4－21,1970)の言う全内蔵型(selfcontainment)で、軽く、外観に優れ、従来の義肢にできることはすべてできるものでなければならない。

むすび

義肢の感覚フィードバック装置の実用化を妨げている因子のうち重要なものは、感覚の検出器の問題と情報伝達手段が未解決なことの2点である。検出器の問題は困難ではあるが現在の進歩した工業技術をもってすれば解決不可能な問題ではないであろう。有効な情報伝達手段が開発されるまでは、義肢の感覚装置は基礎的研究の段階から脱することはできず、臨床的には義肢の装着訓練期間中に使用できる程度と考えられる。しかし動力義肢の現状を打破し、多数の関節を自由に動かすための方法として、骨格筋や末梢神経と電極を生体

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

内で電気的に結合させる研究が進められつゝあり(Stein, R. B., Bull. Prosth. Res., BPR 10-17 : 51-62, 1980)、動力義肢のためのこの方法は義肢の感覚装置にも利用できるものである。近い将来、永久接着義肢(permanently attached artificial limb)とともに、感覚装置を備えた動力義肢の出現も夢でないであろう(図6)。

本研究は大阪電気通信大学の西原一嘉助教授、大阪大学基礎工学部の末田 統 博士、川村義肢株式会社の富永晟浩氏などとの共同研究として行われたものである。

今回も内容にふさわしいイラストを描いていただいた大阪大学医学部附属病院リハビリテーション部の林 義孝 理学療法士に深謝する。

文 献

1. 磯部成夫, 他：義足の補助感覚系に関する基礎研究, 第6回バイオメカニズムシンポジウム前刷, 333-341 (1979)
2. 川村次郎：義手の感覚装置について, 日本整形外科学会雑誌, 45, 755-768 (1971)
3. 川村次郎, 他：義肢の感覚フィードバック装置の開発の現況, 総合リハビリテーション, 7, 749-754 (1979)
4. 川村次郎, 他：義肢の感覚フィードバック装置－成果と展望－, 第8回バイオメカニズムシンポジウム前刷, 207-219 (1983)
5. 西原一嘉, 他：電気刺激を用いた義足の感覚装置の研究, 日本人間工学会関西支部大会講演論文集, 15-22, (1983)
6. 末田 統 ：皮膚振動感覚による情報伝達 － 義手の感覚装置とその効果 － , 大阪大学 (1972)

NII-Electronic Library Service