

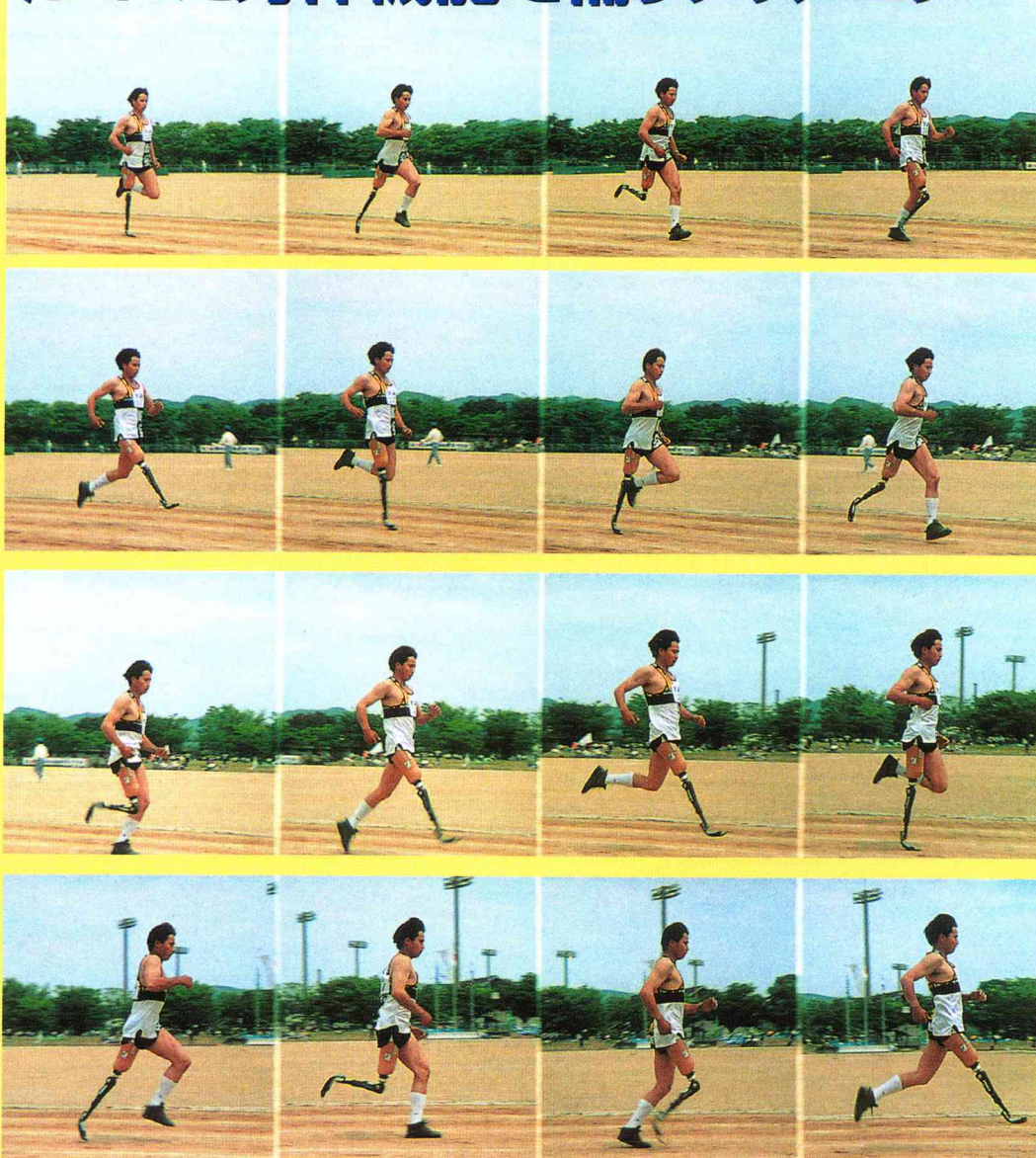


失われた身体機能を補うテクノロジー

不測の出来事により、身体機能を失う可能性は誰の身にも起こりうる。そして往々にして失われた身体機能がその人の仕事や人生にとって、欠くべからざるものであることも。

そんな場合、テクノロジーは人の身体機能をどこまで補うことができるのだろうか。失われた身体機能の補助という視点から、義肢装具の最先端技術の現状と展望をレポートする。

マイコン制御によるインテリジェント義足によるランニングの様子。移動速度の変化に対応した脚部の振り出しによって、よりスムーズな動きを再現する（写真：兵庫県立総合リハビリテーションセンター）。



装具技術がプロ復帰を支えた

1990年、読売ジャイアンツの優勝を決めたのは、9月8日のヤクルト戦で吉村禎章選手が打ったサヨナラホームランだった。この時ファンの歓喜の声を背に塁を回るヒーローの左足は、実は自力では走ることさえままならぬ状態だったといわれる。2年前に守備中に起こった衝突事故による腓骨神経麻痺が、彼の足先の自由を奪っていたのである。神経の麻痺によって足首から先が垂れ下がってしまう。そのため走るには、爪先に弾力を与えて固定し、踏みつける力の反動を利用して足を持ち上げる装具が不可欠だった。激しいリハビリによって養われた残存機能による運動能力の強化と、足首をサポートする装具によって吉村選手はプロの舞台を走っていたのである。

ハンデキャップを克服して活躍するには、本人の心身を削る

ような努力があったことはもちろんである。その一方でプロスポーツ選手の足を支えた装具技術というものにも技術の可能性の視点から着目してみる価値がありそうである。

吉村選手の苦闘の物語は、あるひとつのことを想起させてくれる。すなわち、人はテクノロジーの助けを借りて、人生での重荷を克服し、不可能を可能にすることができるのかもしれないということだ。今回は、そんな切り口から義肢装具の先端技術に着目してみよう。

電動義足の断念からマイコン制御式へ

吉村選手の装具は爪先のバネによって足の踏み切りに相当する動きを補完するしくみになっていた。現在、事故や病気などで脚を失った人たちのための義足も、同様に爪先の反動を利用する仕組みになっている。また膝上からの義足などでは、ち

ようどサスペンションのような機構によって、膝から下を蹴り出せるように工夫されている。

こうした義足開発の最前線では、マイクロコンピュータを用いたインテリジェント義足といわれるものが実用化されてきている。

「制御が可能な歩行装置が必要だという発想から始まって、最初は動力源をもった義足を作ろうと考えていたんです」

神戸大学工学部の瀬口靖幸教授（故人）のもとでインテリジェント義足の開発に携わってきた現・兵庫県立総合リハビリテーションセンター福祉のまちづくり工学研究所の中川昭夫氏は、当時のことをそんなふうに回想する。

かつてハリウッド製のSFドラマに『600万ドルの男』という番組があった。事故によって手足を失ったパイロットが、NASAのスタッフによって開発された義手・義足によってスーパー・サイボーグとして蘇り、活躍するという物語である。中川氏らの当初の目標である電動義足は、こうしたサイボーグ的なメカニズムを想起させる。しかし、現実の壁は厚かった。

「電動で動かすということは、アクチュエーターが回りっ放しになりますから、電池の消耗がきわめて激しいという限界があったんです。実用性を考えた場合、動力式はあきらめざるをえませんでした」

そうしたことから、開発の目標は従来のエア式の義足をコンピュータ制御によって、よりフレキシブルに歩行状況をフォローできるようなものにしていく方向に変わった。エア式の義足とは、膝を曲げた時に義足内に設けられたシリンダーの空気が圧縮され、その反動を利用してすねの部分を前に蹴り出す仕組みになっているものだ。

人の脚も歩行時などには「振り子運動」によって、余分な筋力になるべく使わずに歩けるような構造になっている。だから、膝にあたる蝶つがいをつけただけの義足でも腿を振り出すことで歩くことは可能なのだが、まったく膝の筋力が働かない場合、思い切りももを動かして「振り子」運動を起こさねばならず、疲労がはげしい。そこで「蹴りだし」をつけてやるために、義足ではエア式のバネや油圧機構が膝部分に与えられるようになってきたという経緯がある。

これだけでも、かなり歩きやすくなるのだが、問題は運動速度が変化するような場合にある。歩く速さが変われば、本来すねを蹴り出す速度もそれに応じて変化する必要があるのだが、単純なサスペンションでは、その微妙なコントロールができない。

日常生活の中での人の歩行活動に、さまざまな速度の変化が組み込まれていることを考えれば、より自然な歩行に近付けるために、蹴りだし速度の制御が重要な要素となることは容易に想像できるだろう。

そこで歩行速度を検出し、それに応じてサスペンションの空気圧をマイクロコンピュータで制御することにより、すねの振出し速度を可変にしようという発想が生まれた。電動が不可

C O L U M N

写真：吉村禎章氏（元読売ジャイアンツ選手）

膝をつなぐ4本の靱帯のうち、 3本が断裂 装具をつけて復帰した不屈の闘志



1988年7月6日札幌円山球場での中日戦。吉村は、3回裏に100号目のホームランを記録、続く4番・原、5番・呂のクリーン・アップ連続ホームーという10年ぶりの快挙により巨人の一時的な試合運びとなっていた。そんな8回表、レフトを守る吉村は、中尾が打ったフライを目で追いかけてながら難なくグローブを構えた……その瞬間だった。その同じフライを追ってダッシュしていたセンター・栄村の姿が吉村に重なった。

ふいの衝突事故。吉村の左膝は反対に折れ曲り、完全脱臼。軟骨や神経も損傷を受ける重傷で、なによりも膝靱帯が3本同時に切れてしまうというスポーツ選手としては最悪の怪我となった。

選手生命の危機……。激痛のなかで、吉村は負傷の重大さを医師の口から告げられた。

米国で靱帯と軟骨の蘇生手術を受けた後、血の滲むようなリハビリによって復帰をめざす吉村だったが、腓骨神経の麻痺は彼の膝下の自由を奪ってしまった。

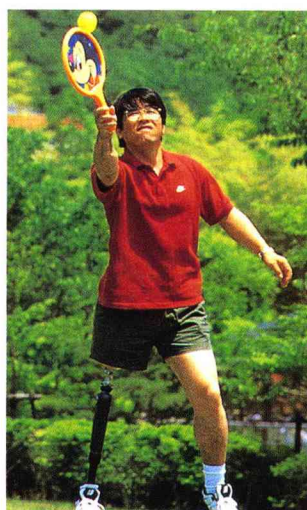
腓骨神経麻痺回復が望めない限り復帰は不可能だろう。医療関係者の大方がそう見ていた。麻痺によって足首から先が垂れ下がってしまい、地面を蹴ることができないのだ。

しかし吉村は周囲の予想をくつがえし、脚の麻痺を補う装具を身につけてプロの世界に復帰してきた。1989年9月2日、ヤクルト戦、代打でのカムバック。約1年ぶりのバッターボックスである。結果は平凡なゴロに終わったとはいえ、再起不能と噂された男の不屈の姿は、多くの観客に感動を与え、観客席総立ちの拍手を呼んだ。

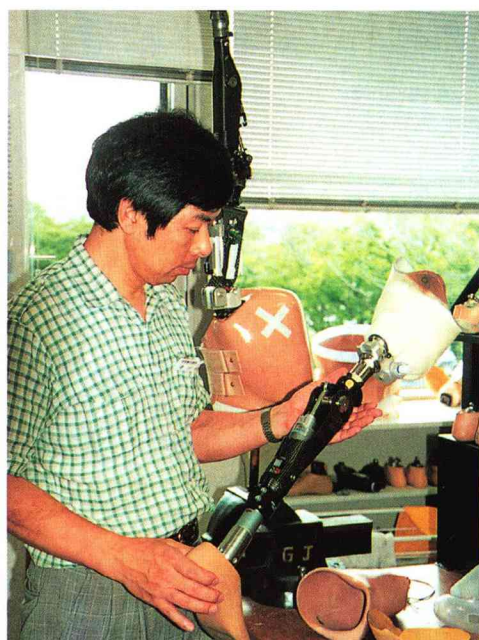
第一線に復帰した吉村は、その後1998年9月に引退するまで10シーズンにわたって好成績を残した。代打の切り札として、こ一番の勝負に起用されてきたことは記憶に新しいところだ。負傷がなければ、球史に残る記録を打ち立てたかもしれないと言われつつも、不屈の精神でありにも大きな障害を乗り越えた吉村の生き方が、見る者に記録を越えた大きな勇気を与えてくれたことは間違いない。（敬称略）



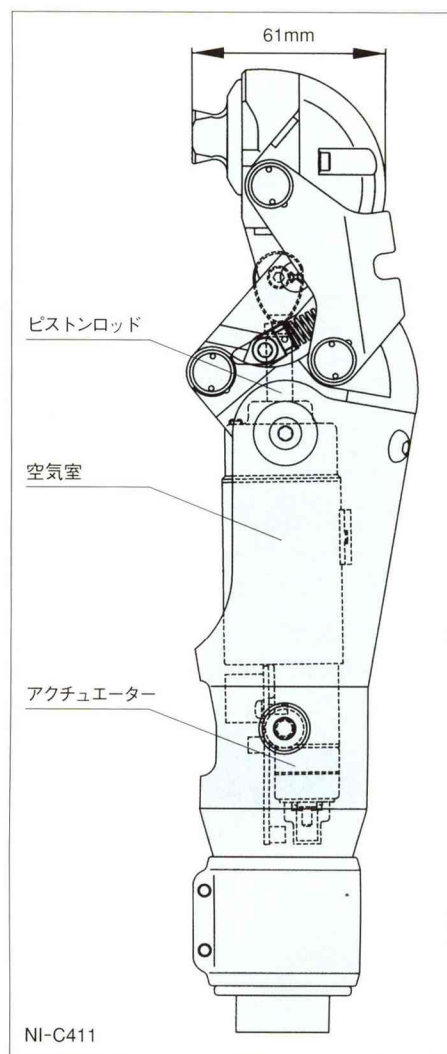
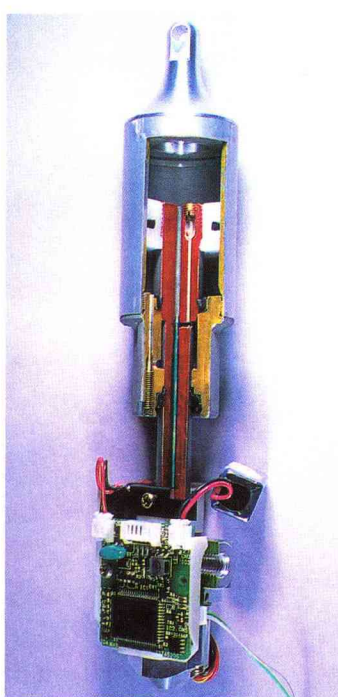
通常の歩行は練習次第で義足とは気付かせないくらいに自然な動きができるようになる（写真：ナブコ）。



体重が乗った時には荷重ブレーキにより安定する仕組みが工夫されている（写真：ナブコ）。



爪先はゴム素材の弾力によって蹴りの効果を得られる工夫がされている。義足を持っているのは開発者の中川氏。



インテリジェント義足の構造（ナブコ資料より）。

インテリジェント義足のエアシリンダー部分の断面模型。ニードル（青い部分）をアクチュエーターで上げ下げして、空気の流れ道を変える仕組み。緑のボードにマイコンが取り付けられている。初期の頃は、コンピュータが「背負う」ほど大きかった。アクチュエーターも小型省電力になり、リチウム電池なら交換も年に1度で十分というところまできた。

能であるならば、せめて動きをコントロールすることで、自然な歩行に近付けられるのではないかというわけだ。

速度変化への対応がスムーズな歩行を可能にした

神戸製鋼所のメカトロニクス開発室の協力を得て実用化を前提とした研究をめざすことになった瀬口教授、中川氏らは、塗装ロボットなどに使われているティーチング・プレーバック方式という制御方式を応用し、脚の振りだし速度をコントロールできるシステムを研究開発したという。

空気圧の制御はニードル弁によって行われる。歩行速度の検出は、膝の部分に取り付けたスイッチによって、1サイクルの時間を計る。すねの一振りの時間を計り、速い時には空気圧を高く、遅い時には低く調整する。これによってゆっくり歩行から早足、さらには軽く走るまでの速度変化に応じたレスポ

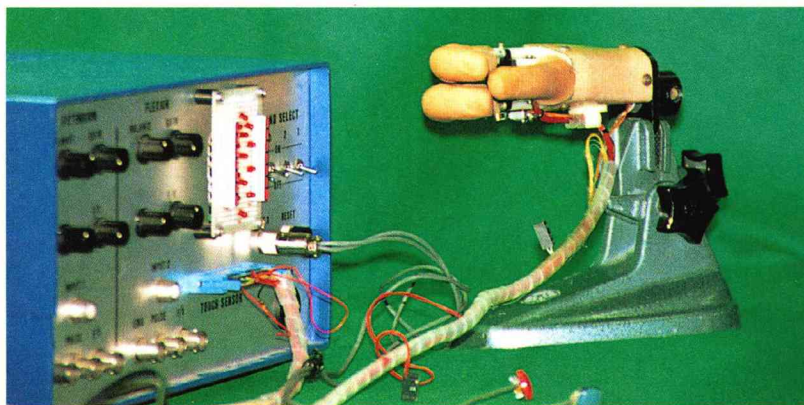
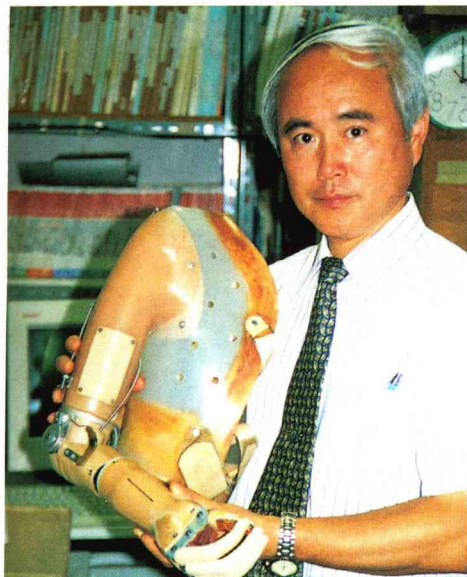
ンスが得られるようになった。使用感は大きく向上し、「自分の脚で歩いているような気がする」との感想が聞かれるほどになったという。歩きながら会話を楽しんだり、街歩きを楽しんだりできる心のゆとりができたという声もあるようだ。

「最初は走ることまでは考えに入れていませんでした。それで使用者の中で走ったという人が出てきたときにはちょっとビックリしたんです。練習や個人差によりますが、今は100m・18秒くらいまでの走りには適応できることが分かっています」

インテリジェント義足は、国内では㈱ナブコが、海外では英国のブラッチフォード社がすでに製品化しており、改良が積み重ねられつつある。

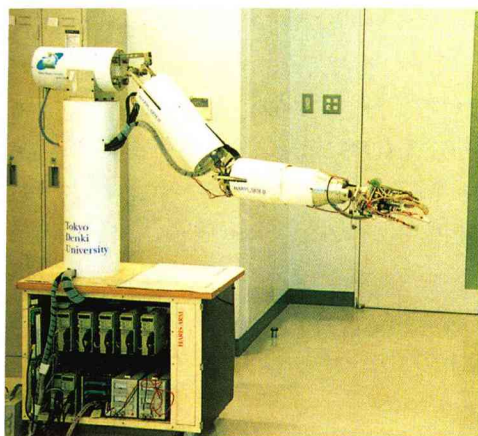
今後の開発の方向性について中川氏に尋ねてみると、どうやら2つの方向性がありうるということだった。

「ひとつは第三世界のような、経済的にあまり裕福とはいえ

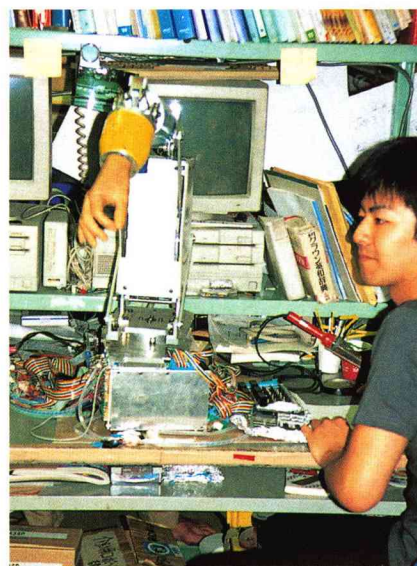
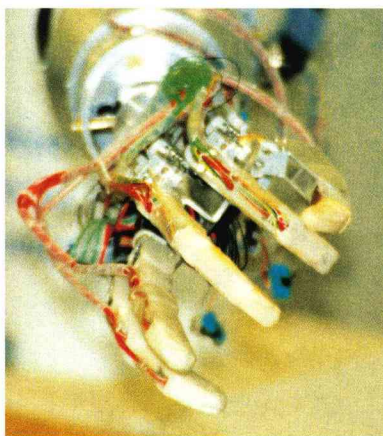


開発中の最新式電動義手。コントローラーに並ぶ赤いLED（発光ダイオード）は、親指の表面にとりつけられた13個のタッチセンサーに対応している。

PL関連の事情によって現在は実用化への試みが中断している電動式の肩義手。持っているのは斎藤教授。



ソフトウェア（義手の制御プログラム）開発用のロボットと取り付けられた手の部分。人差指と中指に横方向の動きが与えられている。



ロボットハンドに義手用の装飾グローブをとりつけたところ。介護ロボットの原形と考えられる。

ないところで使えるような製品や仕組みをどうやって開発していくかということです」

エレクトロニクスを応用したオーダー・メイドに近いインテリジェント義足は、まだまだ途上国などでは高価で手が届きにくい。

そしてもうひとつの方向性は、エア式よりもさらに高度な機能を付加できる油圧式のインテリジェント義足開発ということだ。

「すでにドイツ製の油圧式マイコン制御義足が製品化されていますが、エア式の倍以上の価格になってしまうため、よほど経済的な余裕のある人たちがしか使うことができないのが現状です。これをどうやってコストダウンしていくかが問題です」

油圧式義足は、膝をロックやそれに近い設定にすることができるため、つまづいた時の膝折れによる転倒を防いだり、階段をゆっくりと降りるなどの動作が可能であるという。

メイド・イン・ジャパンの電動義手をめざして

歩行に比べてあまり大きな動力を要しない義手では、電動化の可能性はかなり高いようである。この分野の第一人者である東京電機大学の斎藤之男教授がサリドマイド児童のために最初の電動義手を制作したのは1960年代のことだったという。

「ロボットの手のような義手で、子供のおもちゃにはなったが、あまり使われませんでした」（斎藤教授）。

カスタムICなどない時代にフィードバック制御を取り入れた苦心作だったが実用的な利便性という点で、いま一步だったようだ。この最も初期のものも含めて、斎藤教授らは当初、肩からの義手を開発していたという。

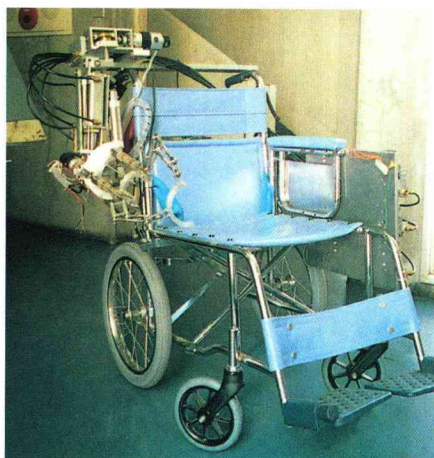
1970年には科学技術庁の研究費も得て、89年頃には北米からの問い合わせに応じて、2人の肩切断者に電動義手を供与する直前までいった。価格的にもかなり高価になることが予想されたが、1人はどうしても自分の手でワインが飲みたいので、ぜひ電動義手を入手したいという要請があったという。

ところが、ちょうどその翌年からPL法が施行になるという時期にあたっており、研究室レベルでは万が一の誤操作による怪我（目を傷付けてしまうなど）が起こった場合の補償までをフォローできないとの判断により、肩義手の実用化はその時点では断念せざるをえない結果になった。

その後、電動義手の開発が新たな段階を迎えたのは、昨年1998年からのことである。メイド・イン・ジャパンの電動義手を実用化することを目標とする厚生省のプロジェクトがスタートし、



おむつ交換用補助ロボットののためのリフト機構。人の運動メカニズムにヒントを得た（二関節筋の拮抗によって安定した動きが保たれる）油圧システムによって、信号切断時の誤作動が起これない機構になっている。16Wという小さなバイラテラル・サーボでなんと60kgの負荷を持ち上げる。右の金色のパイプ状の部分が油圧シリンダー、その下の銀と黒の部分がサーボ。



切断ではなく、麻痺によって腕が使える人のためのサポートシステム。動かなくなった腕を機械的にサポートすることでリハビリ効果も期待できる。

斎藤教授らは手首から先の義手を想定した新たな電動義手の完成を目指すことになったのである。ドイツとアメリカでは、すでに製品化された電動義手が存在しているが、サイズが大きくてアジア人には合わないうえ、外見も20年以上にわたってモデル・チェンジがされていない。このあたりで、優れた日本製の電動義手を開発しておくべきだというわけである。

斎藤教授の研究室が開発する電動義手は、指先にセットした13個のタッチセンサーによって対象物のかたい・やわらかいを判断してものをつかむことができるもので、外観も本物の手により近い質感をもたせるための装飾用グローブと組み合わせられる。加工技術面では、CAD/CAM（コンピュータ支援による設計/製造）と連動した光造形を導入するなど、新たな手法が模索されているという。

義手の駆動は、残存部分の筋電位を利用して行う。身体の2カ所にセンサー・スイッチを取り付けることで、閉じる・開くをコントロールする。ハンド部分はごく軽量に作られ、中心になる構造部分のみでは210g（試作品）。既存のドイツ製のものが450gもあるのと比べると半分以下である。電源にはリチウム電池が用いられ、最大で約5kgの握力が出せる。『600万ドルの男』に比べればかなり非力ではあるが、ワインを飲むには十分な握力である。

さしあたっての目標は、実用に十分な性能の電動義手を完成させることにあるが、斎藤教授らは義手の機能をより高度化するために、さらに先のシステムまで見通した研究も行っている。現状、電動義手の動きは、親指・人差指でつかむというもののだが、人差指・中指ではさむ動作を加え、より高度な手の機能を付加するなど試みられているという。

電動義手から介護ロボットへ

電動義手の研究は手を失った人に、もう一度ものをつかむ

自由を回復するものだが、その技術的なシーズは、もうひとつ別の可能性へとつながっている。すなわち介護ロボットである。人の手のメカニズムは、ロボットに取り付けられれば、食事をさせたり、ものを取ってあげたりできるものになる。音声認識と組み合わせれば、寝たきりの被介護者が、自分の手の代わりに使える体から離れた手になり得るのである。

「一般には、ロボットのような冷たいものに介護をさせるなどけしからん、という批判は少なくありません。研究が新聞に取り上げられた時にはある医大の学生さんたちのグループ

から抗議が来たほどでした。ところが、そのグループの方たちが3カ所の老人病院で調査をしたところ介護ロボットというものに対する反対意見がひとつもなかった。それでおわびの手紙が来たんです。夜中に水が飲みたい、頭がかゆい、自分が思うように食事をしたい……ヘルパーさんには頼めないことをロボットがあれば気軽にできるというんですね」（斎藤教授）。

介護の現場では、力仕事を要求されることも多い。ベッドから車椅子に移したり、おむつを換えたりする場合などである。重労働に介護者が腰痛をおこしてしまうことも少なくない。こうした場面でも、実は介護ロボットの助けがきわめて有効だと考えられる。そして、その場合に重要なのが、安全面での信頼性である。

従来の工業用ロボットなどでは、NC（数値制御）の信号が途絶えた場合に誤作動は必至であった。介護においては、安全上たった一度の誤作動も許容することはできない。斎藤教授の研究室では、二関節筋の拮抗によって安定した動きが保たれる人の運動メカニズムにヒントを得て、信号が途絶えても誤作動を起こさないシステムを開発し、実用化へ向けて研究を進めている。

＊

老いの問題も含めて、人は一生のうちにさまざまな障害に直面せざるをえなくなることがある。そうした人が負わねばならない痛みや苦しみをやわらげ、生きていく力を与えるためにテクノロジーを役立てていくという理念は、ある意味で工学にとっての理想の姿といえるかもしれない。それは福祉工学に限定されるものではなく、おりにふれ技術に携わる者が立ち返ってみるべき「ものさし」といえるかもしれないだろう。

取材協力・写真提供：兵庫県立総合リハビリテーションセンター・福祉のまちづくり工学研究所、東京電機大学工学部知能機械工学科・斎藤研究室、(株)ナプコ、(株)オフィスよしむら