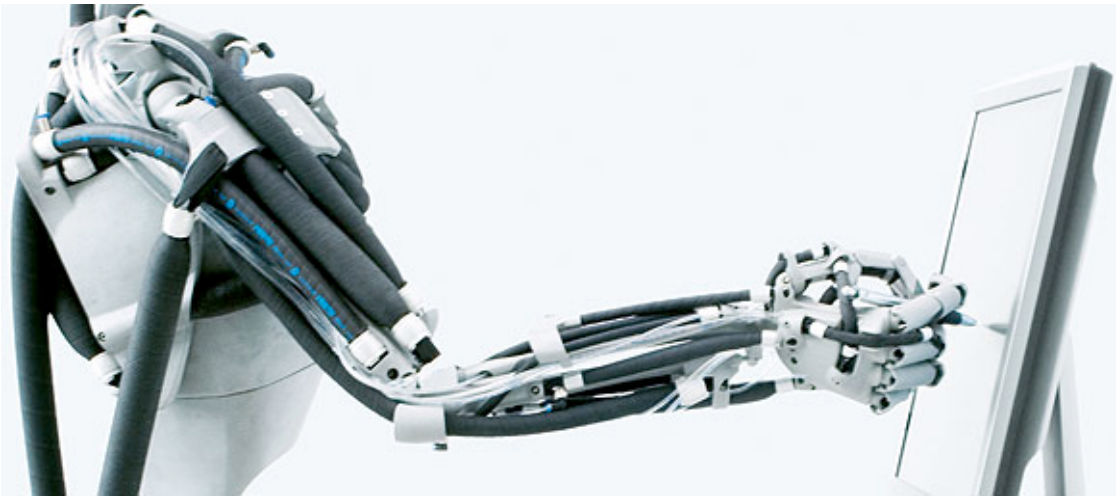
ファクトリー・オートメーションから人命救助、人工臓器、エコ発電まで

「ゴム人工筋肉」が開く未来の扉



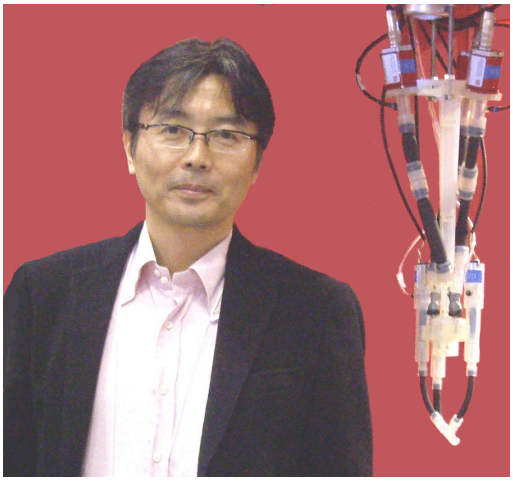
人工筋肉とは、ゴムや導電性ポリマー、形状記憶合金、カーボン・ナノチューブなどで作られた伸縮性のアクチュエーター（作動装置）である。人工筋肉という名の通り、生体組織の構造と機能を工学的に模倣するバイオミメティクス技術の一つである。人工筋肉を構成する素材が合成樹脂など柔らかい素材であることや、動きが金属機械より柔軟であることなどから、ソフトアクチュエーターとも呼ばれる。中でも空気圧で伸縮するゴム人工筋肉（空気圧ラバーアクチュエーター）は作動する力が強く、工場で重いものを持ち上げたり運んだりする作業機械やロボット、パワード・スーツ（ロボット・スーツ）、ドライブ・シミュレーターなどに応用されている。今後、災害や事故等からの人命救助ロボットや、生体内埋め込み型の人工臓器、空気圧を電気エネルギーに変換して蓄積する新しいエナジー・ハーベスト技術など、ゴム人工筋肉が活躍するフィールドはますます広がると期待される。そこで、人工筋肉を使ったものづくりに注力する株式会社ソフトメカ（茨城県つくば市）の豊田晃央（とよだてるお）社長にお話を伺った。

（インタビュー：サイエンス・プロデューサー　川口伸明）

人工筋肉技術の匠

――豊田社長が進めておられる人工筋肉によるものづくりとは、何をめざすものなのでしょうか？

豊田:ソフトメカは創業から５年目を迎えます。この間、ドイツのＦＥＳＴＯ社（FESTO AG&Co）のゴム人工筋肉（fluidic muscle）を使って、主に工場で重いものを持ち上げたり動かしたりするための機械に組込むロボットハンド(図１）や粘性の高い溶液を振盪により混和させる振動発生装置（図２）などファクトリー・オートメーションをめざしたものづくりを進めてきました。工作機械メーカーや医療機器メーカー、電機メーカーなど様々なクライアントと仕事をしてきました。その一方で、圧縮空気が動力源であるため、二酸化炭素の排出を著しく低減できるゴム人工筋肉を環境低不可な生活エネルギーとして活用するＢtoＣ型コンシューマー向けの開発研究もしてきました。パワーアシスト自転車や腰痛低減スーツなどがそれですが、現在、試作を重ねて特許戦略を練っているところです。これにはドイツのメジャー企業からの試作要請もあります。そして今年２０１１年からの新たな事業目標として掲げているのが､「人工筋肉テクノロジーで人の命を守る」ということです。



株式会社ソフトメカ　代表取締役　豊田晃央氏

1964年、千葉県生まれ。千葉工業大学工学部で機械工学を学び、石川島播磨重工業（現・IHI）で災害復旧用遠隔操縦ロボットなどの技術開発に携わった後、1999年に独立。以来、人工筋肉を用いた遠隔操縦ロボットやサーボコントローラなどの開発に取り組んでいる。写真右手の義手のような構造体は、ゴム人工筋肉を用いて人の指のように滑らかな動きを実現した「柔軟ロボットハンド」（製作：ソフトメカ、2009年）。　http://www.softmech.net/

１４年前、まだ人工筋肉とは出会っていない頃ですが、当時勤務していた石川島播磨工業（現ＩＨＩ）で災害復旧用の遠隔操縦ロボットの開発に携わっていました。今ではそのロボットは防災用として国土交通相などに全国で１５台ほど配備されていますが、開発当時には様々な困難がありました。前途多難なことが次から次へと起こり、いつの日かこの状況は人間の耐久試験を行っているようなものだと実感したほどです。そのような中で唯一、苦労の甲斐があったことを思い出します。それは実際の土砂崩れの災害現場でそのロボットが活躍できたときのことです。土砂崩れは老夫婦が営む温泉旅館の近くで発生し、雨があともう少し多く降ると土石流となってその旅館が流されてしまうという場面でした。やっとのことで土砂崩れによる大量の土砂を遠隔操縦ロボットで除去できたとき、そのご夫婦から感謝の言葉を頂きました。その時初めて、困難にチャレンジすることの大切さを知ることができました。それからもう既に１２年が過ぎようとしています。今また、原点回帰しようとしているのかも知れません。

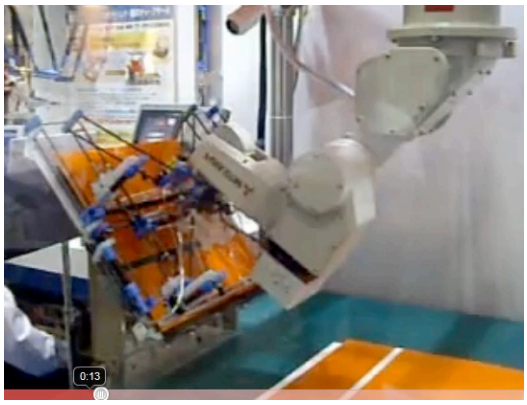


図1．大型軽量ロボットハンド

ヘッドに取り付けられた人工筋肉により液晶基板などの薄板を掴んだり離したりして搬送できる（製作：ソフトメカ、協栄産業、2009年特許出願）。

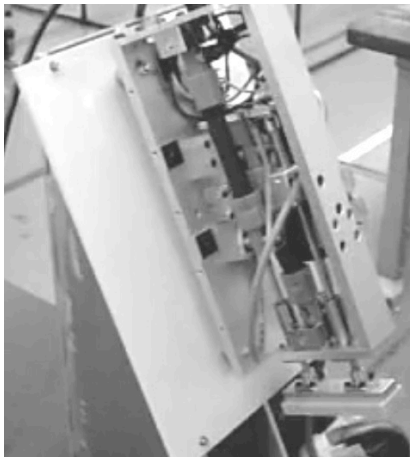


図2．振動発生装置

2つの人工筋肉が激しく収縮・弛緩を繰り返すことによりサンプルの混和などに利用（製作：ソフトメカ、2010年）。

■人工筋肉とは

ここで、人工筋肉について、基礎的な情報を整理しておこう。

物理的・化学的エネルギーを動力に変換して、ロボットの関節を屈伸させるなど、物を動かしたり制御したりする機械的・流体圧的な機構をアクチュエーター（actuator：作動装置）と呼

ぶ。電動モーターやピストン-シリンダーなどのほか、デジタルカメラの手ぶれ補正に応用されている超音波アクチュエーター（超音波モーター）など様々な原理のものが実用化されている。

人工筋肉は、素材自体が伸縮性を有するソフトアクチュエーターであり、圧縮空気をゴムホースに導入して伸縮させるゴム人工筋肉や、導電性ポリマーに電圧をかけて伸縮させる人工筋肉、カーボン・ナノチューブに電圧をかけて伸縮させる人工筋肉、形状記憶合金を過熱したり冷却したりして伸縮させる人工筋肉、磁性ゲルに磁場を与えてゲルの体積を変化させることにより伸縮させる磁性ゲル人工筋肉（フレキシブルポンプ）などがある。

人工筋肉の応用形態としては、ロボットや重機などにおける人間の骨格筋を模した文字通りの人工筋肉や、人工心臓・人工肛門等の人工臓器の駆動素子等のマクロな系への応用（パワーアクチュエーター）のほか、薬物徐放システム用デバイス、マイクロポンプやマイクロバルブ等のミクロな系への応用（マイクロアクチュエーター）も進められている。

■ゴム人工筋肉の構造と伸縮のメカニズム

空気圧式ゴム人工筋肉は、管状のゴムの表面またはゴム内部に金属製もしくは繊維製のワイヤーやネットを張った構造(図３)をしており、コンプレッサーなどから供給される圧縮空気によって伸縮して、その断面積および長さが変化する。ゴム管内の空気圧力の増加に伴い、ゴム管の断面積が軸方向全長に亘り均一に大きくなるが、ある一定の直径まで断面積は増加するがそれ以上は広がらないため、軸方向に収縮して、長さは短くなる（図４）。空気圧力による膨張力とゴム弾性力との釣り合いにより、断面積と軸方向全長が定まるため、注入する空気圧を変化させると人工筋肉の膨張量が変化し、人工筋肉の長さが変化する。これによって、人工筋肉を更に収縮させたり、収縮を一部回復（弛緩）させたりすることができる。このとき、人工筋肉が収縮する際には引張り推力を発生させることができる。このような原理を応用し、人体の動作を支援する動作支援装置やヒューマノイド・ロボット、湾曲動作をなす内視鏡装置など、様々な特許も生まれている（Ref. 2-8）。

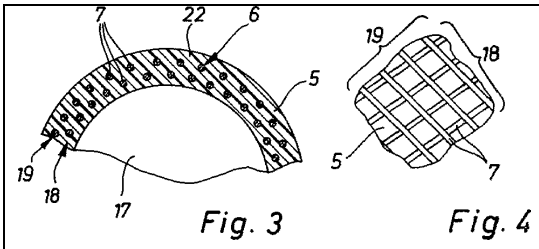


図3. ゴム人工筋肉の構造例

特許3711242「作動装置」(Ref.1、FESTO AG&Co)より

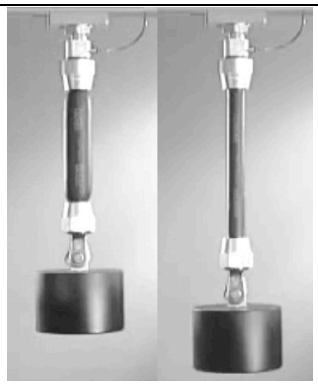


図4. ゴム人工筋肉の収縮と弛緩

空気が流入すると収縮し、空気を放出すると元に戻る。写真は、FESTO社製Fluidic Muscle（内径10mm）

人工筋肉との出会い

――人工筋肉をものづくりに使うようになったきっかけをお聞かせください。

豊田：2000年を間近にひかえた頃、災害復旧用の「遠隔操縦ロボット」の開発に苦心していました。そんなある日、お世話になっていた大学の先生から埃をかぶった柔らかいネットのようなもの渡されました。見た目は編み目模様のホースみたいで触った感触は使い古した帯紐のようでした。それが、初めて「ゴム人工筋肉」を手にした時の率直な感想でした。ゴム人工筋肉の初期モデルであるマッキベン式人工筋肉だっ

たのですが、自動車の塗装ロボットでテストしたところ、動きが悪く実用化には程遠かったそうです。それもその筈、マッキベン式人工筋肉とは１９６０年代にアメリカの大学で人体機能を観察するために考案されたものであって、ロボットアームを動かすために作られたものではなかったのです。しかし複雑な人の筋肉構造と機能をシンプルに作り上げたところはさすがと感じました。構造は、ゴムチューブの周りにナイロン繊維のネットを巻いただけのもので至って簡単。先生は私に、「よかったらこれを自由に使っていいよ」と言われ、あらためて思いました。「軽い、非常に軽い。この感覚はまさにその時に苦労していた事の解決手段になるのではないか」と。開発していた遠隔操縦ロボットは、人の代わりに建機に乗せ、無線で操縦する機械で、まるで鉄人２８号のような仕組みでした。遠隔操縦ロボットには、北から南まで日本中のどこで土砂崩れなどの災害が発生しようとも、２４時間以内に出動して災害復旧に対応できなくてはなりません。そのために持ち運びが簡便で、分解組み立てが容易にできるブロック構造にする必要がありました。一つ一つのブロックは、最大限に軽量化を計ったものの、振動衝撃に耐えられるように堅牢にしなくてはならず、結果的に非常に重たくなる。その組み立てには腕力を要しました。「ブロック構造をもっと簡単に、もっと軽く、もっと楽に出来ないか」と毎日のように考えていた私は、この人工筋肉は、遠隔操縦ロボットのアーム部分のブロックを軽量化することができる。組立時の腕の筋肉疲労を軽減するものだと理解し、心がワクワクするのを感じました。使い古された帯紐のようなものと出会い、ここから私と人工筋肉との未来への旅が始まったのです。

人工筋肉が描き出す未来

――当時、人工筋肉は未だ実用段階には無かったということでしょうか？

豊田：私が遠隔操縦ロボットと人工筋肉との融合に取り組み始めた頃、実は、地球から遥か遠く離れた火星の大地でひそかに活躍することが期待されていた人工筋肉があったのです。アメリカ航空宇宙局（ＮＡＳＡ）が計画した火星探査機マーズ・パスファインダー（Mars Pathfinder）に搭載されたローバー（Mars Exploration Roverと呼ばれた探査車は火星の表面を動き回り鉱物採取や地表写真を地球に送る役目を果たしていました（図５、Ref.9）。

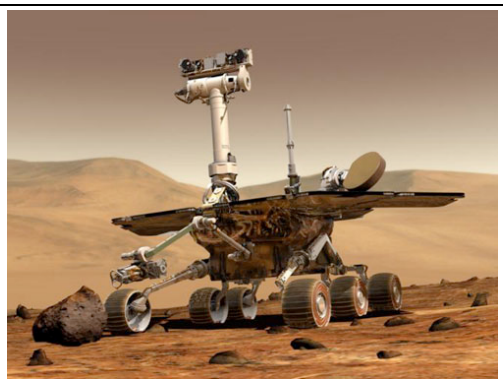


図5. ローバー‘Spirit’(MER−A)

当初、火星表面に砂嵐が吹き荒れた時のことを想定して、ローバーのカメラレンズに付着した砂を拭きとるワイパーを取り付ける検討が行われていました。ＮＡＳＡでいろいろと試案した結果、高分子材料を使った電気で動く人工筋肉でダストワイパーを作る計画が考案されたのです。このタイプの人工筋肉は、軽量でかつ、わずかな電力で作動させることができるため、製造コストの削減と信頼性の向上に寄与すると考えられました。その後、日本の宇宙開発事業団（当時ＮＡＳＤＡ、現在はＪＡＸＡ）との共同プロジェクトである小惑星探査機「はやぶさ」（ＭＵＳＥＳ−Ｃミッション）に応用されることになりました。このミッションでは、小惑星「イトカワ」の探査が主な目的であったため、ロケットから衛星まですべて小型化する必要がありました。人工筋肉はダストワイパーだけでなく石をつかむグリッパーや、石をローバーに収納

するためのロボットアームまで応用展開されました。ここで検討された人工筋肉は、通称エレクトロアクティブポリマー（ＥＡＰ：Electroactive Polymer）と呼ばれ、導電性、圧電性、電歪性、イオン交換性のものなど数種類あり、いずれもコンパクトな形状に仕上げることができます。マッキベン式人工筋肉ほどの力は出ないけれど、軽量コンパクトで、省電力仕様にできるというメリットがあります。このようなコンパクトタイプの人工筋肉は、ＥＡＰの他に形状記憶合金を応用したものもあります。ワイヤー状の金属でできた人工筋肉は、線径が0.05～0.1mm程度で髪の毛のようなサイズです。その両端に電池のプラスとマイナスを接続すると、瞬く間にワイヤーが縮み、力を発揮します。

――人工筋肉技術の進歩には壮大な宇宙への挑戦が深く関わっていたのですね。

豊田：宇宙開発を背景に小型軽量化が進んだＥＡＰや形状記憶合金でできた人工筋肉は、今では小型のロボットアームや蝶々などの動くおもちゃによく使用されています。今後、携帯電話のオートフォーカス機構や電子ブックのタッチパネルのボタンなど、私たちの身近な技術に応用されていくでしょう（Ref.10）。

４０個の人工筋肉が微笑みを形作る

――最近ではヒューマノイド・ロボットの技術が飛躍的に進歩し、産業技術総合研究所の「未夢」のように人間そっくりに歌って踊れるものまで現われましたね。

豊田：人体は、およそ２００本の骨と４００個の筋肉から構成されています。顔の周りには細かく配置された筋肉が４０個も集中していて、目や口を自由自在に操っています。何かに緊張すれば、眉毛のまわりの筋肉が動いて眉間にしわがよる。笑い話に花が咲き、リラックスしている時には、顔の筋肉全体が弛緩する。手のひらほどのわずかな面積の中でいくつもの筋肉が微妙にバランスを保ちながら作動しているという、まさに神業です。

未夢のような人と同じような表情を実現できるロボットのことを一般に「アニマトロニクス」と呼びます。身近なものとしてはディズニーランドのアトラクションに出てくる海賊たちや、ステージの上を歩き回る恐竜などです。アニマトロニクスとは、「アニメーション（動作）」と「エレクトロニクス（電子工学）」の二つの言葉を合成してできた言葉で、「電気仕掛けの人形を動かす技術」という意味です。一方、機械仕掛けの人形を動かす技術といえば、江戸時代に登場したお茶運びのからくり人形が思い浮かびます。どちらも見ていて楽しいものです。エンターテイメントの世界は技術革新が早い。近い将来、人工筋肉仕掛けのアニマトロニクス技術が３Ｄテレビを通してリアルすぎるほどの微笑みを人々に与えるかもしれません。

図6. サイバネティック・ヒューマン「HRP−4C 未夢（みーむ）」（Ref.11、写真中央）
2010年デジタルコンテンツEXPOで人間のダンサーと一緒に歌と踊りを披露。振り付けはTRFのSAMによる。

――人工筋肉を応用していくと、見て楽しめて、なおかつ快適な生活を創造することができるのですね。

豊田：本格的な少子高齢化時代を迎え、最先端

のテクノロジーが人間に歩み寄るアプローチがマスコミを賑わしている昨今ですが、そうしたものの一つとして、「パワーアシスト・スーツ」があります。腰痛予防や重労働のアシストなど人工筋肉が組み込まれた大リーグボール養成ギブスのような装置を身にまとい、人間の筋力を補助するものです。この装置は、力がなければ持てない重たいものを軽々と持ち上げられるので、介護や建設現場、工場などの重労働を軽減するのに役立ちそうです。また、アシストスーツはリハビリを必要としている人にも応用されています。事故やけがで腕や脚などが不自由な人が回復に向けてリハビリ治療を行う際、体の動きをサポートする。アシストがあるだけでリハビリへの不安がなくなり、完治への意欲が増していく。このように、ロボットテクノロジーは既に生活の中に入ってきているのです。

また、最近の「ウェアラブルコンピュータ」は一段と進化しています。靴にセンサーを搭載してランニング時のデータを小型の音楽プレーヤーで記録する事ができるので、気持ちのいい音楽を聴きながら体調管理やその時の調子に合わせたペース配分をコントロールすることが可能となります。人工筋肉はこのような分野でも活躍が期待されています。例えば最近、「動きをセンスするドレス」が開発されました。服そのものが携帯電話になっている。体の動きにあわせて電話をかけることができたり、「走っている」とか「休んでいる」などの情報を発信することができたりするのです。おまけに電話がかかってくると肩をマッサージするように振動もする。人工筋肉を使えば体の疲れを検知して、優しく肩を揉みほぐしてくれることも可能となるでしょう。

１０年前、ある大手企業の研究所では、家事ロボットを実現するために、人工筋肉を使用したロボットの研究を始めています。人工筋肉を使って、アニマトロニクス技術とロボットテクノロジーとウェアラブル技術を融合することで、ドラえもんが自転車に乗って買い物する姿を見られる日もそう遠くはないのでは。

人工筋肉で８０万キロワットのエネルギーを収穫する？

――エネルギー産生にも使えると伺ったのですが。

豊田：CO_2削減に関する環境ビジネスが活況で、太陽光や風力発電などのグリーン電力設備への投資が盛んに行われています。このように石油依存からの脱却が世界的な課題である昨今、「エナジー・ハーベスティング」(エネルギーの収穫）という新しい概念が興りつつあります。この収穫技術は太陽光などの自然エネルギーだけに限定されるのではなく、ハイブリッド車や電動アシスト自転車が、ブレーキをかけた時の制動エネルギーを、電気エネルギーに回生変換するシステムや、人が歩いたり走ったりして生じる運動エネルギーをバッテリーに蓄電するシステムなども含まれます。社会のありとあらゆるところにエネルギーの実がなっているのですから、これを収穫しない術はない。この分野にも人工筋肉が役に立ちます。ＳＲＩ（Stanford Research Institute）により、シリコンでできた薄い膜が変形すると電気エネルギーを作れる発電システム（ＳＲＩ型人工筋肉アクチュエータ）が開発されました（Ref. 12-13)。この技術を使えば、人の呼吸で携帯電話の電源をまかなうことができそうです。この技術は、先に述べたＥＡＰをベースにしています。通常ポリマーに電気を流して筋肉を収縮させるのとは逆に、筋肉が収縮したら電気が発生する仕組みです。またこの技術は波力発電にも使われています。海上に浮かべたブイに仕込まれたＥＡＰが波の揺れによって作動し発電します。ちなみに、日本の海岸線の総延長距離は３００００㎞にもおよび、そのすべての岸に打ち寄せる波の総エネ

ルギーは８０万キロワットにもなると試算することができます。これは原子力発電所１基分に相当する発電量であり、その一部でも収穫することができれば、よりよい環境作りに貢献できると思います。

人工筋肉テクノロジーで人の命を守る

――最後に、これからのミッションとビジョンをお聞かせください。

豊田：最初にも申し上げましたように、今年からわが社ソフトメカの事業目標として掲げた「人工筋肉テクノロジーで人の命を守る」という理念が私のミッションになります。ライフセービングプロジェクトの推進です。これは、災害・事故現場からの生存者救助や戦地における地雷除去など、危険な場所に立ち入って人が行わなければならない作業の回避や、ナノテクなどの最先端科学の研究など、クオリティ・オブ・ライフ（ＱＯＬ）をさらに向上させていくための手法の確立を、人工筋肉テクノロジーの利用により実現していくものです。以下の３つのプログラムを中心に取り組んで参ります。

１．災害復旧用遠隔操縦ロボット（図７）

土砂崩れや地震、火山の噴火など、あらゆる自然災害の発生時期と場所を正確に予測することは現状の技術においてまだ多くの課題が残されています。しかし一旦災害が発生した場合には一刻も早く復旧作業を行わなければなりません。全国のどこにおいてでも迅速に被災者の救出と土砂や瓦礫の除去作業に取り掛かる必要があります。迅速に作業を進めるためには災害救助用として配備された特殊車両だけではなく、災害現場の周辺にある一般のショベルカーなどを導入して総合的に復旧作業を行うことが有用となります。当然、現場で作業を行う人々の安全を確保することも重要なことです。そこで２次災害を防ぐために現場に導入される建設機械を操縦するオペレーターに代わってロボットを搭載して遠隔操縦することにより安全に復旧作業ができるシステムの確立が求められています。

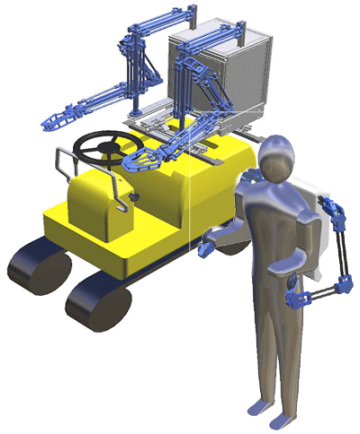


図7. 災害現場など危険な場所で、人に代わって重機等を操縦する人工筋肉ロボット

図８．心臓の拍動を補助する人工筋肉ユニット（体内埋込み型）

２．心筋型心臓補助装置（図８）

心疾患は国内における３大疾病でもあり、そのうち重篤な心筋症の方は心臓補助を受けながら心臓移植を長く待ち続けております。２００９年には臓器移植法が改正され関連の方々の期待感は増しておりますが、その反面、小児に対する技術的な課題やドナー提供者などへの配慮も解決しなければなりません。このような背景のなか昨年には心臓から送られる血液をバイパスしてポンプで循環させるタイプの国産仕様の心臓補助装置が認可されてもおります。一方、１９９０年代には背中の骨格筋を心臓に巻きつけて補助することにより血栓症のリスクがない

画期的な手法が考案されましたが、骨格筋は心筋と違い短期間しか機能しなかったために現在ではその手法は使用されておりません。しかしながら心臓を外側から補助する方法は血液の抗凝固法を施す必要がないためにその実現化に期待が寄せられており今後もその技術の確立と発展が強く望まれています。

３．地雷除去支援用ロボット（図９）

図9. 人工筋肉を用いた地雷除去装置

貧者の兵器と呼ばれる対人地雷は１９９７年に条約で使用を禁じられましたが、それまでに世界全体で１億個も埋設されていると見られています。アジアでは特にカンボジアやベトナム、ミャンマーなどに未だ多くの地雷が残存しています。また地雷原においては地雷を１００％除去できたことが確認できなければその一帯に足を踏み入れることを禁じています。しかし一部の地域では復興のために農作業を行う目的で地雷原に立ち入り被害に合う人も少なくありません。カンボジアの地雷除去組織ＣＭＡＣの話によるとカンボジアには密林が多く手作業で地雷を一つ一つ確実に取り除いていかなければならない状況だそうです。このままのペースでは除去作業が完了するまでに１００年以上もかかるという途方も無い時間を要することになります。このような状況を省みて多くの企業や研究機関が地雷除去に関する様々な手法を考案すべく研究開発を行っています。今後もさらに効率よく安全に地雷を除去できる手法の確立が求められています。

ソフトメカではこれらの分野での技術開発をリードすべく、様々な分野とのアライアンスを図っています。このような取り組みにご賛同いただける方やご関心のある企業様などからのご意見やお問合せなど、切にお待ちしております。

（インタビュー：川口伸明）

■参考文献等

Ref.1：特許 3711242 「作動装置」（2000 年国際出願、FESTO AG&Co）

Ref.2：特許 3771056「介護用筋力補助装置」（1998 年出願、山本圭治郎）

Ref.3：特許 4044079「ヒューマノイドロボット」（2004 年出願、杉坂政典）

Ref.4：特開 2006-034346「内視鏡装置」（2004 年出願、オリンパス）

Ref.5：特許 4573798「腰部支援装置」（2006 年出願、ＩＨＩ＆山本圭治郎）

Ref.6：特開 2008-132153「前脛骨筋の機能回復および補助用装置」（2006 年出願、杉坂政典＆津村弘）

Ref.7：特開 2008-247119「車両用運転支援装置」（2007 年出願、マツダ）

Ref.8：特表 2009-527366「ロボットアーム」（2007 年国際出願、フェルロボティクス コンプライアント ロボット テクノロジー）

Ref.9：ＮＡＳＡジェット推進研究所 http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html

Ref.10：トキ・コーポレーション　バイオメタル http://www.toki.co.jp/biometal/index.php

Ref.11：産総研　プレス・リリース http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090316/pr20090316.html

Ref.12：SRI 型人工筋肉アクチュエータ http://www4.fed.or.jp/tansaku/yuki/02_

chiba.pdf
Ref.13：「筋力発電」の最先端
http://wiredvision.jp/news/201003/2010030222.html

インタビュアー：川口伸明（かわぐちのぶあき）

■プロフィール

サイエンス・プロデューサー、薬学博士。
東京大学大学院修了後、国連グローバル・フォーラム日本事務所長代行、株式会社アイ・ピー・ビー取締役Chief Science Officer等を歴任。地球環境や先端科学技術関連の国際会議プロデュース、知的財産戦略コンサルティング、バイオベンチャーのハンズオンマネジメント、産学連携・医工連携事業の開発などに尽力している。趣味はスキューバダイビングと美術館・博物館巡り。

■Website・Twitter・Facebook

http://m31.co.jp/
http://twitter.com/neo_sapiens
http://www.facebook.com/nobuaki.kawaguchi