

パワー増幅ロボットの建築現場への応用

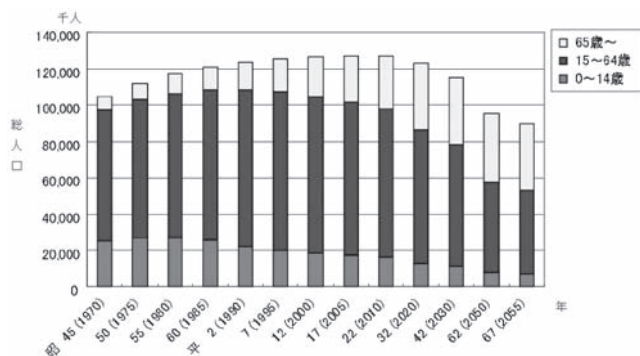
城垣内 剛

近年、我が国のさまざまな分野で、作業者の高齢化問題が浮上してきている。筆者らは、高出力なロボットアームを人間の四肢の動きに追従するようコントロールすることによって、あたかも人間の力が数百倍に増幅されたかのような感覚で、人間単体では不可能な重作業を可能にするパワー増幅ロボット（パワーローダー）の開発を行っている。建築・土木分野での実用化を目指しており、災害発生後の人命救助・復旧作業をはじめ、工場・倉庫等での荷積み・荷捌き作業など、広く応用展開を進めていく予定である。
 キーワード：パワー増幅、ロボット、パワーローダー、重作業

1. はじめに

我が国の総人口は、2005年の約1億2,777万人をピークに、2008年10月1日現在、1億2,769万人で、前年（1億2,777万人：2007年10月1日現在推計人口）に比べて約8万人減少している。また、65歳以上の高齢者人口は、過去最高の2,822万人（前年2,746万人）となり、総人口に占める割合（高齢化率）も、22.1%（前年21.5%）となり、22%を超えている¹⁾。一般に、高齢化率が7%を超えた社会を「高齢化社会」、14%を超えた社会を「高齢社会」と呼んでおり、我が国は既に「超高齢社会」に突入している。

図一1は、厚生労働省から公表されている統計情報「人口の推移及び将来推計人口」から作成したグラフである²⁾。



図一1 人口の推移及び将来推計人口

この統計情報は、1970年～2005年までは「国勢調査」による実績値、2010年以降は「日本の将来推計人口」

(2006年12月推計)による推計である。

この統計から、生産年齢人口と呼ばれる15歳から64歳の人口は、将来大きく減少することが予測される。したがって、労働者の作業効率を高めることは我が国の将来に向けて、早急に解決しなくてはならない問題である。

このような背景の中、人間の動作を機械で直接補助することによって、多少の重労働でも楽に作業できるようにしようという試みが、すでに国内にある複数の大学等研究機関で進められている。それぞれ異なった方式での研究・開発が行われている。これらは、パワースーツ、パワードスーツ、パワーアシストスーツなどと呼ばれており、その名の通り、スーツのように人間が装着するタイプのものが多い。一部は医療用として実用化されはじめている³⁾。しかし、実際に重作業を行う作業者の力を十分補助できる装置は未だ実用化されていない。

建築・土木分野においては、作業員の高齢化は深刻な問題である。クレーン等の重機を使用して作業員の肉体的負荷を代替しているが、重機から下ろされた部材は、実際に使用する現場まで、作業員が人力で運んでいるのが現状である。

そこで筆者らは、前出のような装着タイプではなく、人間の関節構造とは異なる構造を持ちながら、人間の四肢の動作に追従することができる腕と脚を持ったパワー増幅ロボット（パワーローダー）の開発を進めている（写真一）。

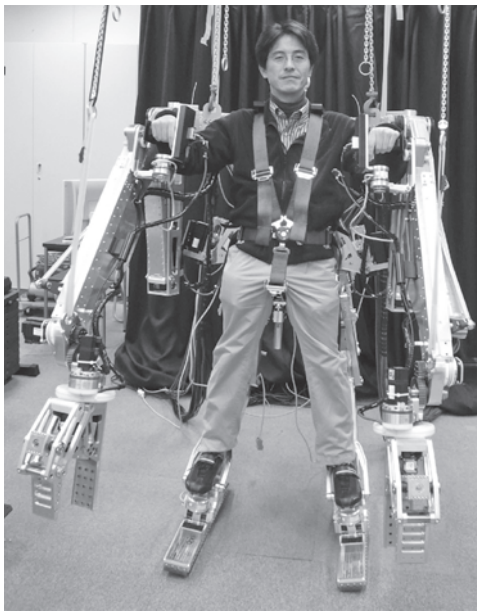


写真-1 パワーローダー（試作機）

2. パワーローダーの基本構成

パワーローダーは、人間の動作に追従する両腕・両脚を持っている。

重量物を拾い上げる動作が行えるよう、腕は左右独立に3次元的な動作が可能である。重量物を把持するときに、さまざまな角度からのアプローチができるよう、腕の先端に装備されたハンドは左右ともに、手首を中心に上下方向に回転、また、前後軸を中心とした回転（ねじり動作）が可能になっている。脚は操作者の脚の動きに追従するため、付け根部分を中心に前後、上下、左右に動作が可能である。

現状の試作機では、両腕・両脚それぞれの操作部に6軸力センサーを搭載し、人間がパワーローダーに与える力の大きさと向きを検出し、これに応じてコンピューターが18機ある電磁モーターのトルクを調整することにより、人間の動作に追従している。

3. 開発の経緯

このパワーローダーの開発に至る以前に、筆者らは装着型（ウェアラブル）パワーアシストスーツの開発を試みている。

(1) パワーアシストスーツ

写真-2は、ウェアラブル・パワーアシストスーツの実験風景である。

これは、筆者らが2003年以前に開発した試作機である。出資評価を受けた際、評価者に実際に装着して

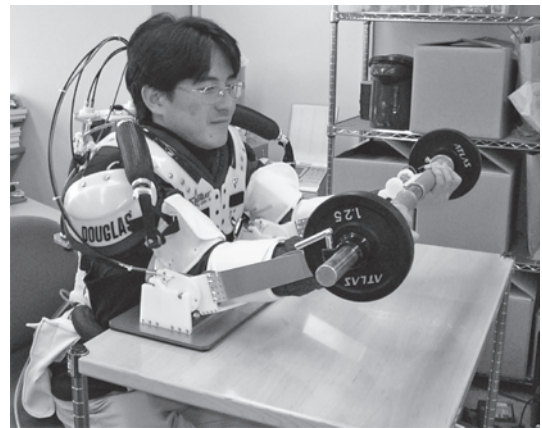


写真-2 ウェアラブル・パワーアシストスーツ試作機

もらい、パワーアシストされている感覚を体感させることができた。

この装置は、空気圧で動作するゴム人工筋肉を、アクチュエーターとして使用している。肩の部分に見える黒い円筒状のものがゴム人工筋肉である。他にも同様のゴム人工筋肉が背中に3本装着されている。背中の中心に配置した1本のゴム人工筋肉で体幹を保持し、肩に配置した2本でこの腕を保持しながら、背中に配置した残り2本のゴム人工筋肉でワイヤーを介してひじ関節より先端部分を引き上げる仕組みである。この構成で手にかかる荷重のうち、7.5 kgをキャンセルすることができる。

ゴム人工筋肉の動作原理を図-2に示す。

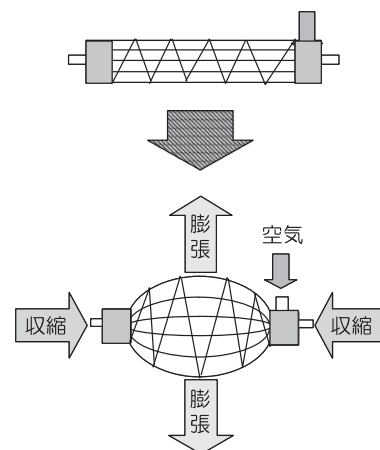


図-2 ギョム人工筋肉の動作原理

ここで示すゴム人工筋肉は、マッキベン型アクチュエーター、エアマッスル、ラバーマッスル等の呼び名で呼ばれているものと基本的な動作原理は同じものである。

両端部に栓をしたゴムチューブに対して、縦方向を拘束するよう、表面にメッシュを被せた構造になっている。

このゴムチューブの中に空気を送り込むと、空気の圧力でゴムチューブが膨張する。しかし、縦方向はメッシュによって拘束されているため膨張できず、径方向の膨張に引っ張られて縦方向に収縮する。膨らみながら収縮する様が動物の筋肉に似ているところが人工筋肉と呼ばれている所以である。

特徴としては、アクチュエーター自体が軽く、柔らかい。さらに、ゴムチューブの内面全体がアクチュエーターの収縮に寄与するため、断面積のみで圧力を受ける構造になっている一般的なエアシリンダー等よりも、パワー・ウェイト・レシオを大きく取りやすいことが挙げられる。反面、動作にエアコンプレッサー等の空圧機器を必要とするため、パワーアシストスーツのような、移動しながらの使用が前提となる機器では、装置全体の重さが問題になる。また、一般に空気圧による機器制御は空気の収縮・膨張などによる、制御遅れが大きく、素早い動作は苦手である。これに加え、ゴム人工筋肉では、アクチュエーター自身が膨張・伸縮するため、さらに遅れが大きくなり、制御性は悪くなる。他にも、与える空気の量と収縮率が比例しない、荷重と収縮率が比例しない等々、制御性が悪化する要因は多い。

しかし、アクチュエーター自身の構造が単純で、軽量であることから、安価に大量生産できる可能性を持っており、今後、制御方法が確立されればパワーアシストに限らず、広く使われる可能性がある。

筆者らは、ゴム人工筋肉の、軽い、柔らかいという特徴に着目し、人体に直接接触する機会が多いパワーアシストスーツには、適当であると判断した。

また、この機器を開発していく中で、人間の力をアシストするだけではなく、人間の力に逆らうように動作するエクササイズスーツ（図-3）、人間の動きを矯正するように動作するスポーツトレーニングスーツ（図-4）などを提案しながら用途開発を行った結果、脳卒中による片まひのリハビリテーションに応用するという用途が見つかった。

この用途に向けて開発した試作機が写真-3である。これは、健全な腕の動きをセンシングして、まひした腕を健全な腕の動きに合わせて動かすことにより、リハビリテーションの効果を促進しようというものである。

この後、商品化に向けたデザインモデルを開発し、マスコミ等で公開したところ、さまざまな分野の方々から高い評価をいただき、米国 TIME 誌の The best inventions of 2006 に選出された（写真-4）⁴⁾。

このような用途展開はあったものの、ウェアラブルタイプのパワーアシストスーツでは、構造上、大きな



図-3 エクササイズスーツ



図-4 スポーツトレーニングスーツ



写真-3 上肢リハビリ支援スーツ試作機
(出典：朝日新聞 2005/10/17)

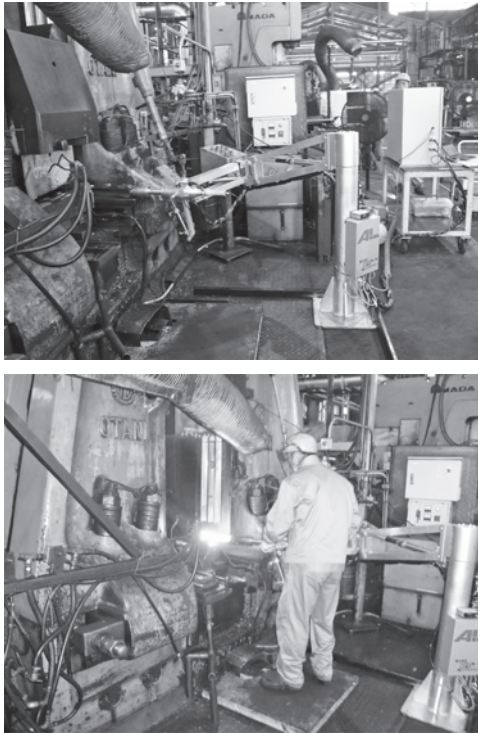
力を出すことは困難であると判断した。なぜならば、人間の関節は回転軸をずらしながら曲がるので、ウェアラブルなスーツタイプの機器が大きな力を出すと、人間の関節に強い負荷がかかることになる。人間の力を補助（アシスト）するだけでなく、大きく増幅するためには、人間の関節に負荷をかけない機構が必要であった。



写真—4 リハビリ支援スーツが掲載されたTIME誌

(2) パワー増幅装置

人間の力を大きく増幅する装置をパワーアシストと区別するために、パワー増幅装置と呼ぶ。パワー増幅装置の実用化の一例として、鍛造作業アシストロボットを挙げる（写真—5）。



写真—5 鍛造作業アシストロボット

鍛造部品の製造を行う企業と共同で、エアハンマーを用いた鍛造作業をアシストするロボットを実用化に向けて開発中である。

ここで製造されるものは、主に、自動車の部品などである。鍛造作業では、1,200℃以上に熱した鉄の棒（ワーク）を先端に金型が装着された数トンのハンマーで整形する。この作業は、3～4mの高さまで空気圧で押し上げられたハンマーを落下させて打ち付けるため、ワークの変形が毎回一定にならない。したがって、ロボットを使って自動化することが極めて難しい。

現状では、作業者は「ハシ」と呼ばれる大型のヤットコを使って、真っ赤に熱せられた約20kgの鉄の塊を掴みあげて金型まで移動させ、ハンマーを打ち付ける作業を行なっている。高熱と轟音の中で体力を使う作業であり、建築・土木業界と同じく、国内の少子高齢化が進む中で若い作業者が減り、作業者の高齢化が進んできている。

現状では、20kgあるワークの重量をキャンセルするように鉛直方向のみ制御している。水平方向は弱いバネ・ダンパーで柔らかく回転を規制しているが、アクティブな制御は行っていない。

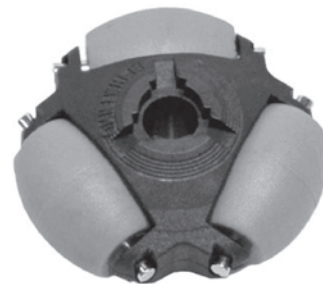
行動範囲が極めて限定される作業では、写真—5のように床に固定した支柱にアームを取り付けて作業を補助することが可能である。しかし、動作範囲が広くなると装置自身を動かす必要がある。

写真—6は、車輪で移動できるパワー増幅装置の例である。



写真—6 車輪での移動を試みた例

この装置は、手元のコントローラーに与える力の大きさと向きにしたがって車輪とアームが適切に動作し、移動しながら作業ができる。車輪にはオムニホイール（写真—7）と呼ばれる全方位型車輪を使用しており、前後左右に自由に平行移動、及び回転動作が可能である。



写真—7 オムニホイールの例

このような装置では、床面が十分平坦で車輪に巻き込むようなものが放置されていないことが、使用上の大前提となる。オムニホイールの代わりに、クローラーを使えば、床面の形状には対応しやすいが、本体の回転を伴わずに平行移動できる方向が前後方向に限定されるため、直感的な操作は難しい。

そこで、操作者の直感的な動作に追従する脚による歩行を試みた（写真—8）。



写真—8 パワーペダル

これは、文部科学省知的クラスター創成事業の「岐阜・大垣地域ロボティック先端医療クラスター」の中で立命館大学と共同で開発したもので⁵⁾、操作者の足の下にある6軸力センサーで脚の出す力の向きと大きさを検出し、これに追従するようにロボットの脚を動かすことにより、人間の約7倍の力を出す装置である。この装置はバランス制御を行わず、人間の出す力を増幅し、人間の脚の動きにできるだけ忠実に追従するように制御されている。この制御方法で歩行を行うことに成功した。これにより、人間の直感的な操作にロボットが十分追従することが確認できたと同時に、人間が平常時に獲得した歩行に関するスキルを用いながら、ロボットによって増幅された力を使いこなすことができるという方向性が確認できた。

4. パワーローダー

これらの成果をもとに、人間の両腕・両脚の増幅を行うパワー増幅ロボット（パワーローダー）の試作機を開発した。

この試作機は、100 kgの重量物を床から2 mの高さまで持ち上げることを目標に設計されている。この

スペックは、過去に行った建築関連会社へのヒアリングに対する回答に由来する。建築現場で現場の作業員が扱わなければならない重量の目安として、手ばらしクレーンのパーツの重量を基準とした。手ばらしクレーンは、建物の屋上で大型のクレーンを解体する際に最終段階で用いられるクレーンであり、これ自体の解体作業はすべて人力で行わなくてはならない。このパーツ類がほぼ100 kg以下に設定されていることから、これを作業員1人で解体できるようになることを将来の目標とし、まず100 kgの重量を扱えることを基準に、建築現場で汎用的に使えることを目指した。

現状では、試作機（写真—1）を用いて、片手で25 kgのおもりを持ち上げる実験を行っており、ほぼ安定した操作ができる段階まできている。

5. おわりに

ハイパワーを望まれる作業現場に向けたパワー増幅装置の開発目標として、建築・土木分野での実用化を想定し、開発を行ってきた。この活動の中で、建築・土木分野以外にも、林業、災難救助、コンテナの荷積み、工場での作業などの潜在的な需要があることがわかった。例えば、トラックは荷物を運ぶだけでなく、荷台を付け替えることによって、ミキサー車にもクレーン車にもなる。部分を取り替えることによって、さまざまな用途に使われている。現在、開発中のパワーローダーも一部のパーツを交換することによって、さまざまな分野に適用できるようなベースにしたいと考えている。

最後に、これまでの開発に多大なるご協力をいただいたパナソニック(株)殿、まこと工業(株)殿に、この場を借りて感謝の意を表したい。

JICMA

《参考文献》

- 1) 内閣府：平成21年版高齢社会白書（内閣府，2009），第1章 pp2.
- 2) 厚生労働省：労働統計要覧（厚生労働省，2008），表番号1 人口の推移及び将来推計人口.
- 3) 「NEDOBOOKS」編集委員会：RT スピリッツ 人に役立つロボット技術を開発する（NEDO，2009）.
- 4) THE BEST INVENTIONS OF 2006, TIME November.13.2006.
- 5) Katsuya KANAOKA, Go SHIROGAUCHI and Haruji NAKAMURA: Power Pedal as a Man-Machine Synergy Effector - Bipedal Walking with Human Skill and Robot Power- (2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation).

【筆者紹介】

城垣内 剛（しろがうち ごう）
アクティブリンク(株)
代表取締役 副社長

