

# ロボット, AI, そして, アシスト技術のパラダイムシフト

東京理科大学 工学部 機械工学科 教授 こばやし ひろし 小林 宏

ロボットは定期的に話題となってきた。今は、ドローン、倉庫内で稼働する AGV (無人搬送車)、学術的には、本来固いロボットとは異なるソフトロボットなどであろうか。10 年ぐらい前は介護支援ロボット、その 10 年前はホンダの二足歩行ロボットをベースとした、「人間協調・共存型ロボットシステム」の研究開発 (Humanoid Robotics Project : 1998-2002. NEDO) で、この時は人型ロボットで、あたかもすべての問題が解決するように思われていて、2020 年には自動車産業並みになるという予想まであった。さらにその 10 年前の 1990 年前後は、極地や原子炉内で活動する極限作業用ロボットの国家プロジェクトがあった。原子炉内で活動するロボットについては、いわゆる原発安全説で不要とされてしまったようだ。結果、東日本大震災で国産ロボットが活躍することができなかった。現在は遠隔操作のパワーシャベルなど、無人化建設機械が活躍しているようである。1990 年代初頭の雲仙普賢岳の復興にも無人化建設機械が投入されたが、不完全で誤動作が多く、人間が飛び乗って動作を止めたなどの逸話があるので、無人化技術は IoT の進化に伴い完成度は上がっている。

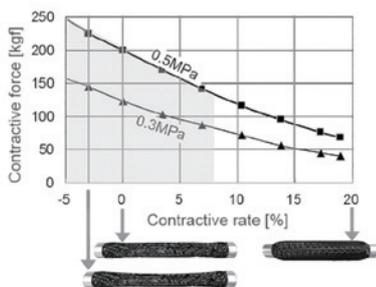
一方、AI は黎明期の 1990 年前後は、BLACK BOX で何が行われているか分からないと批判的な意見も多かったが、20 年以上の時が過ぎ、完全に社会インフラ化している。20 年前の人型ロボットのように、IT 機器の普及と高度化に伴い、AI があれば全てが解決されるだろうと考えられているように思う。1990 年、ちょうど大学院に進んだ筆者は、AI、つまり、ニューラルネットワークを用いた人の顔の表情認識の研究を行っていた。博士課程では、それに加えて人の顔と同じような表情を表出する顔ロボットを製作し、表情の自動認識と顔ロボットによる表出を実現した。その際に、表情の認識、つまり Sensing と、表情の表出、つまり Actuating を結びつけるのは制御 (AI?) なので、その研究をしようと思い、日本学術振興会の海外特別研究員として、1996、97 の 2 年間、チューリッヒ大学の AI Lab. に在籍した。その時の研究内容は蟻のナビゲーションに関するもので、AI というより機能

に関してであり、また、世界的に AI の研究を俯瞰しても、人間のような知能は自分が生きている間はできないだろうと予想できた。あれから 25 年が過ぎ、AI はまさに全ての研究の中心になっているような印象を受けるが、筆者は今でも、人間の知能に匹敵する AI は、生きている限りできないだろうと思っている。

筆者自身は物づくりが好きなこと、および、チューリッヒ大に行って 1 カ月で、上述のように、筆者が生きている間に人間のような知能はできないだろうと思ったため、2 年間は AI の研究をし、その後はエンジニアとして、「本当に役に立つものを作ろう」と決めた。幸い、1998 年 4 月から本学に奉職することになり、本当に役に立つ技術の模索を始めた。

ちょうど 2000 年、マッスルスーツに代表されるアシスト装置の開発を思い付いた。上述のように、当時は人型ロボットの最盛期で、人型ロボットで全ての問題が解決できるような雰囲気であった。一方、筆者は、技術は面白いが、手で持てるのは 100 g 程度の物 (ペイロード) であり、人間社会の中で、本当にどれだけ役に立つのか、疑問であった。2000 年ごろのある展示会で、人型ロボットが階段を登るデモをしていたが、階段の高さ調整を mm 単位で行っていた。当時の制御技術には限界もあった。そのような背景の中、筆者は本当に役立つ技術を模索していたが、「生きていくうえで一番困ることを解決できたら、それは本当に役に立つことではないか」、と考えるようになった。そして、自分にとって一番嫌なことは、動けなくなること、自立できなくなることだと考えるに至り、「生きている限り自立した生活を実現する」装置を開発しようとした。

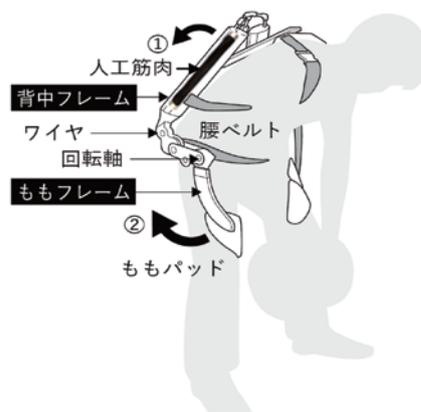
自立には様々な面がある。精神的な自立、経済的な自立、最近では情報に関する自立 (情報を思いのままに扱う) などであるが、筆者が考える自立は物理的・空間的・肉体的なもので、動き続けることができるという意味での自立であり、Actuating 技術である。あくまでも肉体的なことで、情報だけ自由に操れば良い自立ではない。最近、AI やバーチャル空間 (これも 30 年以上前から VR などとして提案されたが)、電子マネ



【図 1】 McKibben 型人工筋肉の出力



【図 2】 初期モデル (2000 年 10 月)



【図 3】 腰補助用マッスルスーツの構成

一、電子商取引など、電子化・情報化に支配されているが、人間が考え、扱える情報量には限界があり、また、いくらそれらが高度化され洗練されても、それは肉体的なものではなく、人間の体を動かすための技術ではない。その意味では、情報、IT 一辺倒になりすぎている感がある。

一方、筆者が 2000 年から進めているアシスト技術は、肉体的自立を支援するものである。情報だけでは体は動かさない、体を動かし続ける技術は不可欠、という強い信念に基づいている。ここで、筆者が開発・製品化したマッスルスーツを簡単に紹介する。

マッスルスーツの最大の特徴は、空気圧式の McKibben 型人工筋肉を採用していることであり、人工筋肉を能動的（アクティブ：外部から圧縮空気を供給）・受動的（パッシブ：内部に圧縮空気をためて使用）に採用しているのは、世界的にみてもマッスルスーツのみである。McKibben 型人工筋肉は、1957 年に Joseph McKibben 氏が、四肢疾患のリハビリテーションや装具用のアクチュエータとして発明した。空気圧式のためコンプレッサが必要で、空気圧は圧縮性があるため精密な位置制御は難しいが、軽量で柔らかく、非常に大きな収縮力を発生するという特徴があり、人間の動きを滑らかに力強く補助するためには適していると考えた。

現在使用している McKibben 型人工筋肉は、直径 24 mm、自然長 280 mm、重さ 115 g で、【図 1】に示すように、0.5 MPa を入れると最大 250 kgf の引っ張り力を発生し、1700 N の負荷時の試験において、100 万回以上の耐久性を確認している。また、収縮率は全長の 30% 程度が最大となるが、縮むほど引っ張り力が弱くなるため、マッスルスーツでは -5~8% 程度までを使用している。自然長より伸びた状態（【図 1】：軸がマイナスの領域）では大きな収縮力が期待でき、この特徴を用い、後述する受動的なモデルを実現している。

開発を始めた 2000 年当初、マッスルスーツは人間のような内骨格で、最も簡単そうに思えた腕の補助を

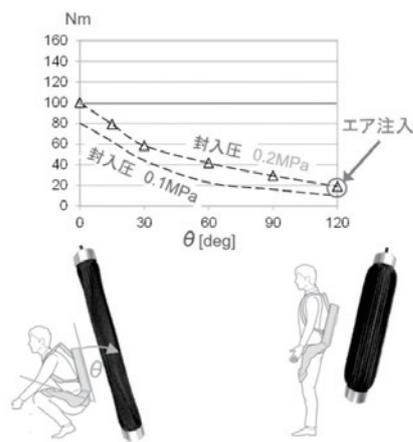
検討した【図 2】。しかし、服がずれる、関節や骨に負担がかかるなどの問題を認識し、外骨格に変更した。この腕補助は、複数の企業からの依頼があり、現場で検証試験を行った。その際、ほとんどの作業者が腰を痛めていることが分かり、2006 年から腰補助に特化したマッスルスーツの開発に着手した。

【図 3】に示すように、マッスルスーツは背中フレームと、ももフレームからなり、両者は回転軸で接続されている。人工筋肉の一端は背中フレーム上部に固定し、他端に設置したワイヤの一端をももフレームに固定している。人工筋肉に圧縮空気を供給する能動的な使い方の場合、使用者が呼吸スイッチなどで電磁弁を介して人工筋肉に圧縮空気を供給し、その収縮に伴い回転軸周りに背中フレームが①のように回転、それにより発生する②の方向の反力をももパッドで受ける。実際に使用する場合は、人工筋肉に圧縮空気が送られると、まず、ももパッドに大きな力を感じ、そこを支点として上半身が起こされるような感覚となる。この構造では、膝を曲げずに上半身を起こす動作および、上半身を直立状態にして腰を落として脚の力で物を持ち上げる動作のどちらでも補助ができ、結果として腰や脚への負担を軽減する。

2014 年の販売開始当初の腰補助用マッスルスーツは、コンプレッサやタンクから圧縮空気をスイッチで人工筋肉に供給するアクティブタイプであったが、利用者から

- ① コンプレッサと、コンプレッサから空気圧を供給するチューブ、もしくはタンクが邪魔で使いにくい
- ② スイッチなどのインタフェースの扱いが面倒くさい、もしくは適していない
- ③ 重い
- ④ 値段が高い

と常に指摘されていた。そこで、これらの問題を解決



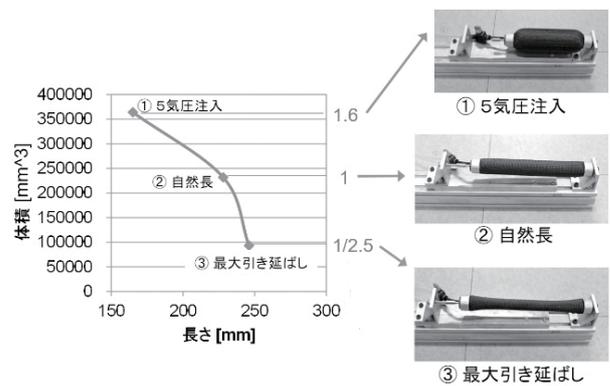
【図4】受動（パッシブ）モデルの出力

した「パッシブモデル」を開発した。

マッスルスーツで使用している McKibben 型人工筋肉は、上述の通り、自然長より伸びる特性を持つ（自然長より伸ばすことができないタイプも市販されている）。マッスルスーツを装着している場合、体を屈曲すると、【図4】に示すように人工筋肉は伸ばされる。この時の人工筋肉内部の体積変化を【図5】に示す。この図から分かるように、体積は減少して半分以下となる。従って、直立時にある程度の空気圧を入れて空気の出入りを遮断すると、屈曲により体積が減るため、（圧力）×（体積）が一定であることより、内部の圧力は増加する（ボイル・シャルルの法則）。例えば、直立時に 0.2 MPa の空気圧を入れておけば、屈曲により体積が 1/2.5 になるとすると、圧力は 2.5 倍の 0.5 MPa となり、外部から 0.5 MPa 供給する場合と同等の引っ張り力が発生可能となる。結果として、【図4】に示すように、100 Nm の伸展トルクが実現できる。

このように、このパッシブモデルでは、コンプレッサもチューブもタンクも不要で、最初に空気圧を入れるだけで良い。また、しゃがむ際は人工筋肉を伸ばして人工筋肉内の圧力を高くするために力が必要だが、その力が起き上がる際の補助力となるため、補助力発生タイミングは自分で動きの方向を変えるだけで良い。従って、スイッチなどのインターフェースを使う必要が無い。さらに、バッテリー、電気回路、電磁弁なども必要が無いため、使用環境を選ばず、連続して使い続けることができるという特徴もある。

2014 年の発売以来、マッスルスーツはほぼ毎年モデルチェンジを行い、外骨格としては、世界的にも圧倒的な安価（136,000 円：税別）を実現した普及モデル：マッスルスーツ Every を 2019 年 11 月から販売開始するに至り、2021 年 4 月時点で、累計出荷台数 2 万台を突破した。現在は 17 の国と地域で販売をし



【図5】McKibben 型人工筋肉の体積変化

ている。

以上のように、マッスルスーツはアシスト装置として開発し、販売してきた。まだ十分に普及はしていないが、アシスト技術とロボット・AI 技術、アシスト技術のパラダイムシフトについて考えたい。

まず、アシスト技術とロボット・AI 技術について述べる。マッスルスーツはロボットか、と時々聞かれるが、おそらく厳密にはロボットではない。一般的にロボットは、Body にセンサ、アクチュエータ、制御装置 (AI) を有する。一方、現在のマッスルスーツは、Body とアクチュエータ（人工筋肉）のみで構成されている。開発当初は、アクティブに空気圧を制御していたのでセンサも制御装置も有していた。つまり、マッスルスーツは圧縮空気を動力源としており、その入出力制御のために、センサと制御装置を必要としていた。しかし、実際の使用場面ではできるだけシンプルであったほうが良く、ユーザの要望もあり、それらを無くしたパッシブ方式にした。もちろん、センサにより人間の意図（動く方向、速度、加速度、力）を自動的に読み取り、人間の思い通りに制御ができればアクティブでも良かったかもしれないが、センサや AI が進歩した現在においても、人間の意図をセンサで読み取るとは、非常に単純な場合を除いて困難である。

一方、マッスルスーツと同様に腰を補助する装置で、ロボットとしての要素を満たす製品を、国内では 2 社販売していた。それらはモータを用いるもので、非常に高額であった。高額なこと、思い通りに動かせないことがおそらく主な理由で、1 社は会社清算、もう 1 社の製品は市場で見かけない。このようにアシスト技術においては、ロボット技術も AI も、実際の使用に耐えうるだけのスペック・価格には、現時点では残念ながら至っていない。ただし、マッスルスーツをはじめ、これらの製品が社会的には話題となり、腰補助の重要性が認知されてきたことは間違いなく、現在は、

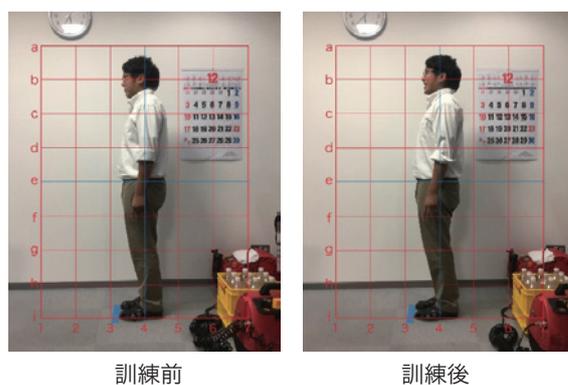
サポート的なものが多く製品化されるようになっていく。ただし、それらの補助効果は極めて限定的であり、おそらく、安い（3～5万円程度）、体につけても邪魔ではない、という理由で今は購入されていると思われる。

- 次に、アシスト技術のパラダイムシフトについて述べる。マッスルスーツの紹介時によく言われたことは、
- 反力を受けるももが痛くなるのではないか
  - アシストされる部位が弱くなるのではないか
  - ももパッドがももに押し付けられ歩きにくい

である。aについては、仕様のいかに力がかかるかは言えるが、長く使う場合の体への影響は、正直、分からなかった。販売開始から8年経つが、最近は全く言われることがなくなり、結果的に懸念に過ぎなかった。bについては、肉体作業により必要以上に使用している筋力を補っているだけのため、その部位の筋力が弱くなることは考えにくかった。これも最近は言われることがなくなった。cに関しては、マッスルスーツの構造上、どうしても仕方のないことで、歩行時に、歩行動作の妨げにならないようにする構造的対策を、オプションとして用意した。

以上は、ネガティブな意見に対して、結果的にはそうではなかった、もしくは対策をしたという話である。ところでマッスルスーツは、腰を補助する装置であり、下半身に対して上半身をまっすぐにさせる、いわゆる股関節を伸展させる機能を有する。上半身を曲げる場合は、通常は重力を用いるため自分の筋力を使う必要はないが、この機能により、マッスルスーツをつけると、屈曲するためには腸腰筋などのインナーマッスルを使う必要がある。また、ももを曲げる・上げるために、通常以上の力を必要とし、インナーマッスルや大殿筋を使うことになる。この効果により、通常では鍛えられないインナーマッスルが鍛えられる。つまり、マッスルスーツの使用により、より健康な体になる、ということまで考えられていなかった、まったく新しい効果が得られるという点で、パラダイムシフトだと考えている。インナーマッスルを鍛えることは、安定的な歩行を持続することにつながるためフレイル対策になる。加えて、腰痛はインナーマッスルの衰えにより、背筋とのバランスが崩れて発生することが分かっているため、インナーマッスルの強化は、その予防にもつながる。

以上のように、マッスルスーツを使うとより健康になる、ということが、アシスト装置のパラダイムシフトであるが、マッスルスーツの機能・効果は、それだ



【図6】機能訓練前後の姿勢変化

けにとどまらない。アシスト装置ではなく、トレーニング装置、機能訓練装置としての側面を最後に紹介する。まず、通常のアシスト時のように、空気入れで空気をためるパッシブな場合である。これは、装着しているだけで股関節の伸展が誘発されるため、装着して大股で歩行するだけでも効果がある。お辞儀運動やスクワット、直立から片足を前に出して腰を落とし、また直立に戻るフロントランジ、もも上げなどを、息を吐きながらゆっくりやるだけでも十分である。このようなほんの数分の動作で、インナーマッスルが強化されるが、筆者の経験では、体重の減少、体脂肪率の低下、ヒップが小さくなる、などの効果があった（効果には個人差があります）。

また、コンプレッサから圧縮空気を送るアクティブな場合は、前屈（下半身に対して上半身を曲げる）からの伸展時に補助、スクワットで立ち上がる際に補助をするだけで、股関節の位置がリセットされ、骨盤の傾きが矯正されるようである。結果として、歩行困難者が歩行しやすくなったり、健常者ではウエストが細くなり姿勢が矯正される【図6】。発声もしやすくなり、目線も上がるようである。このような即時効果は、これまでの装置で実現されたことはないと思われる。

アシスト用に開発、製造、販売してきたマッスルスーツは、その効果を定量的に知ってもらうために、シミュレーション、筋電位、重心動揺、NIRS、作業の効率化など、様々な情報を提供してきた。しかしながら、それらがいわゆる「刺さる」ことで購入につながることはあまりなく、価格、重さ、大きさ、動きの拘束、などが購入意欲をそぎ、本当に困っている方以外には採用されていない感がある。一方、姿勢矯正はその場で確認でき、さらに健康増進にもつながることであり、これはより広く社会に貢献することでもあるので、今後は、この側面からも研究を進め、展開していきたいと考えている。