

ヒトのカラダを拡張する工学

東京理科大学 先進工学部 機能デザイン工学科 嘱託助教 ^{さ さ き}佐々木 ^{とも や}智也

① 助ける工学のその先へ

機能デザイン工学科のキャッチコピーは「ヒトのカラダを助ける工学」です。助ける工学のイメージには、病気や怪我を早く治すための薬や、加齢などによる生活の不自由さを支援する介護、義手や義足といった義肢などがあるかもしれません。このような技術は、普段の生活のマイナス面を取り除くためのものという印象があり、中高生などの若い人にとっては、あまり縁のないものかもしれません。

しかし、少し見方を変えて日常におけるテクノロジーとの関わり方を考えると、カラダを助ける工学は様々なところにあります。メガネやコンタクトレンズは、電気を使わないアナログな機器ですが、視力を補う技術と考えると、多くの人がお世話になっています。また、スマートフォンやパソコンも、私たちの記憶や計算、コミュニケーションを補助してくれる道具です。例えば、知らない場所に行くときには地図アプリ、外国語を読むときには翻訳アプリが助けてくれます。これは、私たちの認知や行動を補助して広げる技術だと考えることができます。

つまり、「カラダを助ける」とは、怪我や病気を治すことだけではなく、見えにくいものを見やすく、覚えきれない情報を扱えるようにすることなどにも関係します。人がもともと持っている能力を支え、生活の中でできることを増やしていく技術も、広い意味ではカラダを助ける工学です。

ここでさらに一歩進めて、「助ける」だけでなく「拡張する」ことを考えてみましょう。テクノロジーは、不便さを減らしてマイナスをゼロに近づけるだけでなく、ゼロからプラスへ、つまり人ができることそのものを増やしていくことにも利用可能です。すでに電話やSNSによって離れた場所にいる人へ声や考えを届けることで、私たちの物理的な距離に関係なくコミュ

ニケーションが取れます。これらは感覚や存在を拡張する技術だといえます。このように、すでに身近にある技術から、これから実現が期待される技術までを視野に入れ、人の能力を広げることを目指す工学を人間拡張工学と呼びます。そして、ロボットやインターフェース技術を使うことで、身体の動きや、ものの感じ方、考え方などの認知まで含めた拡張を目指すことができます。

② 腕を増やすロボット

では、こうした人間拡張工学によって、どのようなカラダの拡張が考えられるのでしょうか？

例えば、第3、第4の腕のように、腕の数を増やすことで身体機能を拡張できるかもしれません。腕が増えると聞くと、SFやアニメ、ゲームの世界の話のように感じるかもしれません。実際、複数の腕を持つ存在は、古くから神話や物語の中に登場してきました。人間にはない身体を持つ存在は、それだけで私たちの想像力を刺激します。

実は、近年では、このような想像上の身体を工学的に実現しようとする研究が進んでいます。ウェアラブルロボットアームを身体に装着することで、腕の数を増やすという研究です。このようなロボットは、Supernumerary Robotic Limbs、略して SuperLimbs と呼ばれています。“Supernumerary”は「余剰の」「余分な」という意味で、“Limb”は腕や脚などの四肢を意味します。つまり、直訳するなら余剰肢ロボットとなりますが、人間の能力を広げるという意味を込めて「拡張肢」とも呼ばれます。

拡張肢には、腕だけでなく、指や脚、しっぽのような形のロボットも含まれます。例えば、第三の腕があれば、両手で作業をしながら別のものを支えることができるかもしれません。第六の指があれば、片手でより大きなものをつかめるかもしれません。身体の後ろ



【図1】 MetaLimbs¹⁾

にしっぽのようなロボットをつければ、バランスを取ったり、姿勢を支えたりできるかもしれません。

ロボットアームやロボットフィンガー自体を作るのも大変ですが、さらに難しいのは、追加した腕や指をどうやって操作するかです。新しい腕を増やしても、その腕を動かすために自分の手を使ってコントローラーを操作してしまうと、せっかく腕を増やした意味が小さくなります。腕を増やすなら、今ある2本の手を自由に使える状態で動かしたいわけです。

そこで、私たちはMetaLimbs（メタリム）という研究を行いました【図1】。これは、足の動きで第3、第4の腕を操作するシステムです。足先の位置や向きをセンサで計測し、その動きをロボットアームの動きに対応させます。足を上げればロボットアームも上がり、足を横に動かせばアームも横に動きます。さらに、足指の曲げを計測することで、ロボットハンドを開いたり閉じたりすることができます。つまり、足を使ってロボットアームを動かし、ものをつかむことができるのです。これによって、両手を使いながら、さらに2本の腕を操ることができます。

ここで面白いのは、足で操作しているにもかかわらず、ロボットアームを「腕」のように使おうとする点です。例えば、ロボットアームでカップをつかむと、そのカップを自分の口元に持っていこうとする人がいます。もちろん、実際に動かしているのは足です。それでも、目の前にあるロボットアームの動きが自分の動きと結びつくことで、身体の一部のように感じられる可能性があります。身体機能の拡張だけでなく、認知にも変化があるのは興味深いです。ただし、足を腕のように使おうとしても、身体部位の構造的な違いによってうまく動かせないことがあります。そこで、ロ

ボット工学の視点から身体を解析する必要があります。

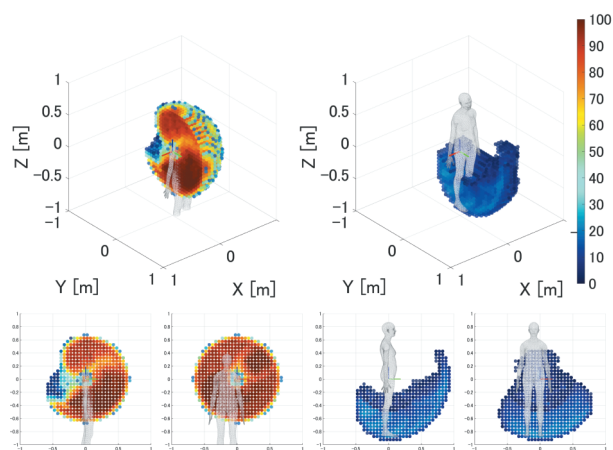
③ 腕と脚の違いを比べる

足を使ってロボットアームを操作することを、さらに工学的に考えてみましょう。足の動きを腕の操作に使うというのは直感的ですが、当然、脚と腕は同じようには動きません。普段、腕は物をつかむ、運ぶ、向きを変える、細かく調整するために使われます。一方、脚は体を支え、歩き、走り、姿勢を保つために使われ、役割が違います。では、同じところはあるでしょうか？ここで、ロボット工学の視点からモデル化を行います。

ロボット工学では、人体の構造を棒状のリンクと回転関節の組み合わせとして扱います。実際の人体は筋肉や腱、骨、球状関節などで構成されており、もっと複雑です。しかし、動きを解析したりロボットの制御に利用したりするためには、まずシンプルなモデルとして表現します。そこで、上腕や前腕を棒のようなリンクとして扱い、肩や肘、手首を回転する関節の組み合わせとして表現します。同じように、大腿（太もも）や下腿（すね・ふくらはぎ）をリンクとして扱い、股関節や膝、足首を回転関節の組み合わせとして表現します。このように腕と脚をモデル化すると、どちらも複数のリンクと関節が直列につながったシリアルリンクモデルとして考えることができます。このモデルでは、腕や脚の動きを7自由度で表します。自由度とは、動かせる方向や関節の数を表す言葉です。各関節が動ける範囲をこれまでの研究で測定されたデータと一致させることで、人間の腕や足の動きをシンプルなモデルで再現することができます。

私たちの最近の研究では、腕と脚のモデルを作業空間という指標によって比較しました。作業空間とは、身体部位やロボットがどの範囲まで手先を動かせるかを表すものです。例えば、腕を伸ばして届く範囲を考えると、自分の前方や横方向、少し上や下など、広い範囲に手を動かせることがわかります。一方で、脚を動かす場合、足先はある程度大きく動きますが、方向によって可動範囲が異なります。前方には届きやすくても、上方向や横方向には腕ほどは動きません。作業空間の指標を使うとこの違いを数値的に表現することができます。

【図2】は作業空間を可視化した解析結果です。左



【図2】 腕と脚の作業空間の可視化²⁾

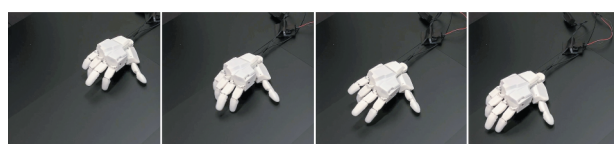
の図が腕の作業空間、右の図が脚の作業空間です。図は手や足が届く範囲だけでなく、色によって姿勢の取りやすさも表現しています。赤色の場所では、同じ位置に届くだけでなく、その場所で手先や足先の向きを様々に変えることができます。青色の場所では、その位置に届くものの、取れる姿勢が限られています。結果を比較してみると、腕の作業空間では、手先が体の正面の範囲では様々な姿勢が取れる一方、脚の作業空間では、足先が届く範囲は広いものの取れる姿勢が少ないことがわかります。この結果は感覚的にも一致するのではないのでしょうか。

腕と脚を単純なシリアルリンクモデルとして扱うことで、複雑な人間の動作を解析し、作業空間を可視化しました。これによって脚では動かしづらい部分では動作の変換をするなどして、ロボットアームをうまく動かすことができるようになります。実際に使用するためには、個人差への対応や動かしているときの身体的・心理的負担など様々な要素にも対応する必要がありますが、人間を理解することでロボットを賢く動かすための技術の一要素として考えることができます。

4 未来のカラダをデザインする

ここまで、ヒトのカラダを助ける工学から、人の能力を広げる人間拡張工学、そして腕を増やすロボットや腕と脚の動きの違いを解析する研究について紹介してきました。では、このような研究の先に、どのような社会が広がるのでしょうか？

手や腕などの新しい身体部位をうまく動かせるようになる技術は、従来の義手や義足の操作にも使える可能性があります。医療や福祉、リハビリテーションへ



【図3】 ロボットハンドによる自律歩行の様子³⁾

の応用として、より多様な人がロボットや情報機器を使えるようになるかもしれません。また、工場や建設現場での作業支援への応用も考えられます。人が両手で作業しながら、同時に何かを支えたり、道具を持ったりしたい場面があります。第三の腕や第六の指のようなロボットがあれば、人の作業を支えるだけでなく、これまで一人では難しかった作業を可能にし、より安全に素早く行えるようになるかもしれません。

もっと想像力を膨らませて、未来のカラダを考えてみましょう。例えば、ロボットハンドそのものが、小さなロボットのように自律的に移動できたらどうでしょう？必要なときだけ人の身体や机に取り付いて作業を手伝い、使わないときは他の人と身体部位をシェアすることもできるようになるかもしれません。このような方向への技術発展を期待して、私たちはAIを使ってロボットハンドの歩き方を生成する研究も行っています【図3】。不便を解消するだけでなく、人間の新しい可能性を探索するための技術を開発しています。

「ヒトのカラダを拡張する工学」は、人間を機械に置き換えるための研究ではありません。むしろ、人間の身体や感覚、認知の仕組みを理解し、それに寄り添いながら、人ができることを広げるための研究です。人間工学が人に合わせて道具や環境を設計してきたとすれば、人間拡張工学は、人の身体の使い方や機能をデザインし直す学問だと考えられます。今回はロボット工学を中心に紹介しましたが、未来のカラダを考えるには、身体の仕組みを知るバイオや医療、人の感じ方や学び方を考える認知の視点も欠かせません。バイオ・認知・ロボティクスを融合することで、人間拡張工学や新しいサイエンスが発展していくでしょう。

参考文献

- 1) T. Sasaki et al., "MetaLimbs: Multiple Arms Interaction Metamorphism," ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, 2017.
- 2) T. Hoshi, T. Sasaki et al., "Inter-Limb Motion Retargeting Based on Workspace Analysis," 2025 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2025.
- 3) T. Sasaki et al., "Locomotion Generation of Hand-shaped Robotic Avatar," Augmented Humans International Conference 2025 (AHs 2025), 2025.