



第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

バイオハイブリッドがもたらす技術革新
Technological Innovations Brought by BioHybrid Integration

バイオハイブリッドが 人間とロボットの関係を再定義する

竹内昌治
東大院情報理工, 東大生研, 神奈川産技総研究所

【発表概要】

- ヒトの皮膚細胞から作製された「培養皮膚」で表面を覆った指型ロボットを作製し、自己修復機能等を実証
- 培養骨格筋組織を用いた二足歩行ロボットを実現。ヒトの二足歩行運動のような細やかで静かな運動をロボットで再現した

東京大学大学院情報理工学系研究科の竹内昌治教授は、筋肉や皮膚、感覚組織などの生体組織を機能として採り入れた「バイオハイブリッドロボット」を提唱している。2022年には、ヒトの皮膚細胞から作製された「培養皮膚」で表面を覆った指型ロボットを作製した。これにより、自己修復機能など生体特有の機能を従来のロボットで再現することに成功した。さらに2024年には、培養骨格筋組織を二足歩行ロボットに組み込み、ヒトの二足歩行運動のような細やかで静かな動きをロボットで実現した。応用物理学会の注目講演では、従来のロボティクスとバイオテクノロジーの概念を刷新する、バイオハイブリッドロボットによる技術革新について紹介する。

【詳細】

生体組織が持つ機能を、ロボットで利用する

竹内昌治教授が提唱するバイオハイブリッドロボットは、生物と機械を融合した、新しいロボットをつくる分野だ。生体組織が持っている機能をロボットで利用することにより、その性能を拡張する。そしてロボットと人間の関係性を再定義していく分野である。

「私がバイオハイブリッドロボットで実現したいのは、全身を皮膚の組織で覆われた、外見は生物と機械の区別がつかないヒューマノイド（人型ロボット）です。そうしたヒューマノイドでは生きた細胞によって、高い感度と選択性を持つセンサーを実現できます。たとえば、人工物では再現が難しい嗅覚や味覚の受容体を、細胞を使って実現したり、触覚や視覚、聴覚を含めた多様な感覚を持つロボットを作り出すことが理論的には可能です」と竹内氏は話す。

2022年、竹内氏と東京大学大学院情報理工学系研究科の河井理雄大学院生（研究当時：修士学生）を中心とした研究グループは、ヒトの皮膚細胞から培養された「培養皮膚」で、実際に指型ロボットを覆い、世界で最初の「生物の皮膚を持ったロボット」（図1）を誕生させた。



図1: 左:培養皮膚を用いた指型ロボット 右: 傷を自己修復している様子

ヒトの身体は、層構造をとる真皮、表皮、皮下脂肪からなる皮膚で覆われている。そして皮膚は、発汗による排熱や、不要なものの侵入を防ぐための撥水機能などを実現する、身体でもっとも大きな臓器だ。この研究では、臓器としての皮膚を機械に実装するための方法、すなわち培養皮膚でロボットのような立体物を覆う方法が確立されている。

指型ロボットは3つの関節を持ち、骨格の中心部を通るワイヤーをモーターで制御することでそれらの関節を動かすことができる。この指型ロボットの周りでヒトの皮膚細胞から培養した「真皮細胞」を、ゲル化したコラーゲン溶液で培養すると、ゲルが収縮し、指型ロボットの骨格をしっかりと真皮層が覆う。その上に、表皮層を形成するための表皮細胞を散布して培養することで、培養皮膚が形成される。

この研究の注目すべき点は、ロボットを皮膚で覆うことで、これまでのロボットにはない機能・自己修復能力を持たせることに成功している点だ。「この指型ロボットは、傷をつけられてもコラーゲンシートを傷口に貼ることで自己修復が可能。つまり、自律的に平常の状態に戻る能力を持ったロボットなのです。さらに撥水機能も再現しています（図2）。このような機能を持つ素材を人工的に作り、ロボットに実装することは難しいとされていましたが、生体組織を使うことで可能になりました。つまり、生体組織を利用することで、ロボットに新しい機能を与えているわけです」（竹内氏）

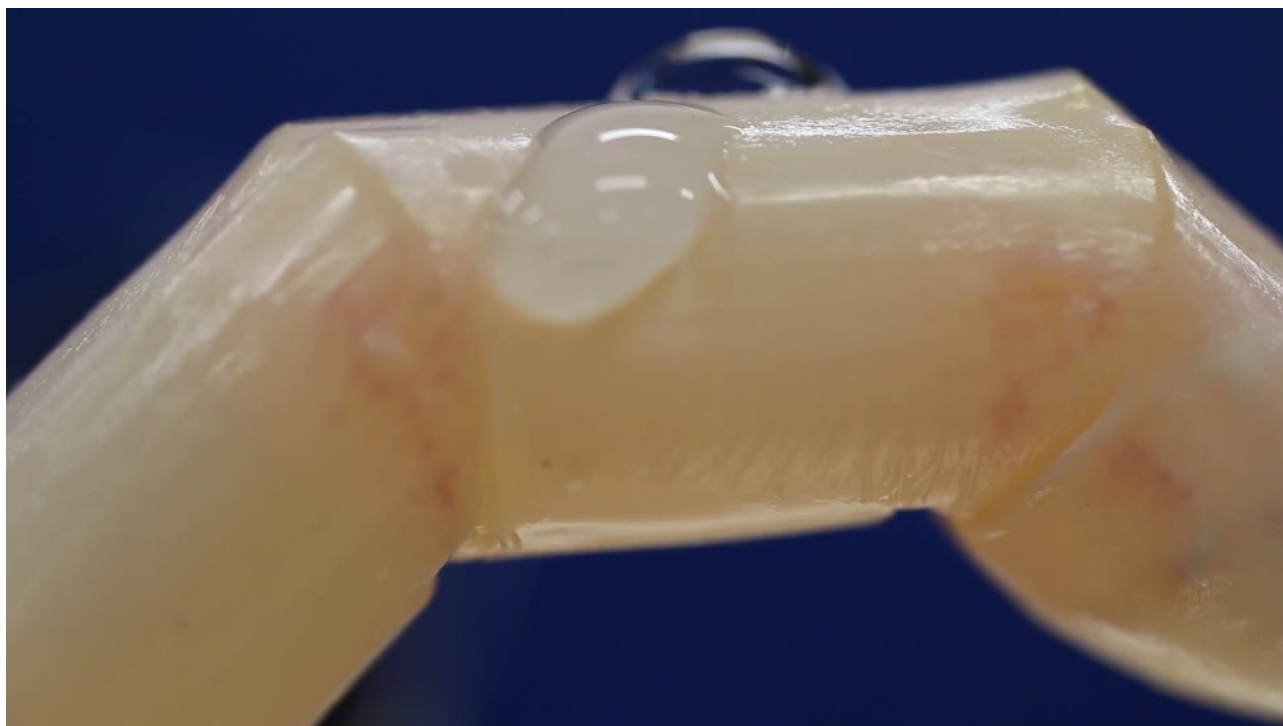


図2: 指型ロボットの皮膚が持つ撥水機能

この技術は、人間のように自己修復が可能で、かつ人間との共同作業などでもお互いを傷つけることのない、やわらかいロボット「ソフトロボット」の開発、さらに化粧品や医薬品のテスト、ヒトへの移植用の再生医療素材へも応用が可能だという。

二足歩行ロボットを、生体組織の筋肉で実現

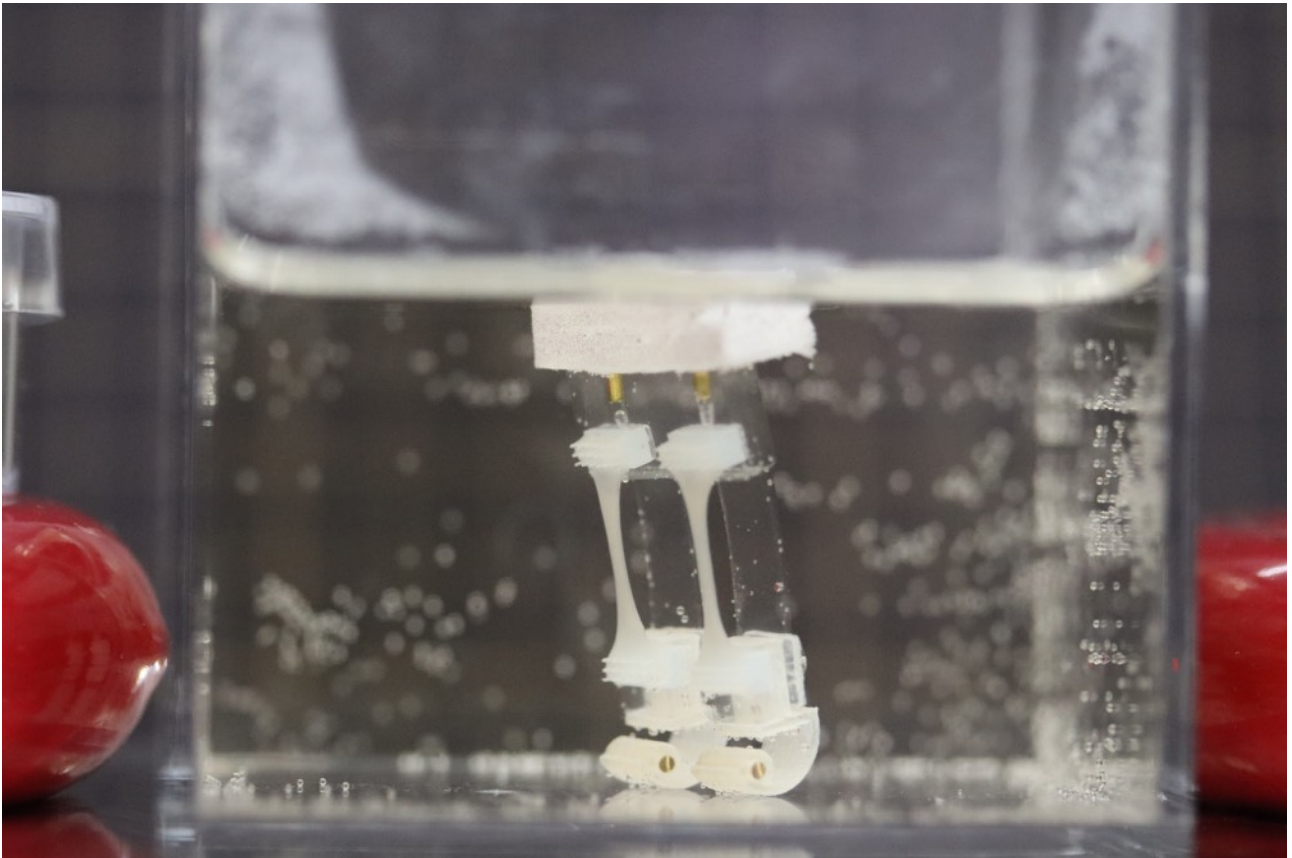


図3: 培養骨格筋組織を用いた二足歩行ロボット

「培養肉」は地球規模の食料問題を解決する可能性から、現在研究が加速している。バイオハイブリッドロボットでは、培養肉と同様の技術で作製された「培養骨格筋組織」を、ロボットの駆動源として用いる。それが竹内氏と東京大学大学院総合文化研究科の金城立来大学院生(研究当時: 修士学生)、早稲田大学理工学術院の森本雄矢准教授らによる研究グループが実現した、培養骨格筋組織によって歩く二足歩行ロボットだ(図3)。

この二足歩行ロボットは、培養液中を浮かぶことで直立し、電気刺激による培養骨格筋組織の収縮運動によって、3Dプリントされた足（ポリジメチルシロキサン〈PDMS〉製）を動かし、シンプルな歩行を実現する。

「筋肉を動力源とすることの長所は、非常にエネルギー効率が高いということです。そして筋肉による動きは、ヒトがそうであるように静かな動きをし、とても細やかであるという特長を持っています」と竹内氏は話す。この二足歩行ロボットは、非常に細やかな旋回動作を可能にしている。ロボットの細やかな動きの指標となる、「回旋率（ロボット長／回転半径で示される）」は、従来のバイオハイブリッドロボットの0.4に対し、その5倍強となる2.1だったという。

また、この二足歩行ロボットの研究は、培養骨格筋組織を駆動源とするロボットの開発だけではなく、ヒトの歩行メカニズムの理解にも役立つという。「たとえば、筋肉の張力が両脚で釣り合っていないと、このロボットはうまく前に進むことができません。シンプルな構造でいて、歩行の複雑な動きを培養骨格筋組織で再現しています」（竹内）

この二足歩行ロボットの応用可能性としては、生体組織を用いた「運動モデル」として、ヒトの歩容（歩き方）の研究がある。また、筋肉に関連した難病（重症筋無力症やALS）の病態や薬剤の解析がある。すなわち薬剤添加時の運動改善効果解析や薬効解析など、薬学や医学分野の研究開発において活用できる可能性があるという。バイオハイブリッドロボット研究の真髄は、生体組織をロボットに応用し、実際に機能させることで得られた知見を人間のさらなる理解へとフィードバックする「リバーエンジニアリング」にあるということだ。今後は、駆動力の向上のために、より大きな培養骨格筋組織を用いる方法などを模索していくという。

「食べられるロボット」が変える、ひととロボットの関係性

「バイオハイブリッドロボットは、生体組織を用いているわけですから、不要になれば食べられるようなロボットをつくることができます。つまり土にかえったり、環境負荷が低いロボットが実現できるのです」と竹内氏は話す。

竹内氏はこの研究の将来の展望として、バイオハイブリッドロボットの技術が構築する、ひととロボットとの新しい関係性に注目している。つまり技術としてのロボティクスを進歩させながら、より人間を理解したり、人間に恩恵をもたらす存在としてのロボットの実現だ。

「バイオハイブリッドロボットに用いる特定の生体組織、その細胞を生み出すためには、iPS細胞などからつくられる内臓器官が必要になります。これらの内臓器官は、ロボットにとっては、必要な生体分子を産生するための『バイオリクター』としての役割を果たします。それと同時に、これらのバイオリクターは、ヒトへ移植可能な人工臓器を作るためにも応用できます。バイオハイブリッドロボットが進歩すれば、ロボットが人間の臓器ドナーとして機能できる時代が到来する可能性があるわけです。ロボットに対する従来の概念を一新しながら、人間のまったく新しい可能性が開拓される。そんな未来を目指しています」（竹内）

応用物理学会の講演では、培養皮膚でできた指型ロボットおよび培養骨格筋組織によって歩く二足歩行ロボットについてのより詳細な研究成果が紹介される。