

B20250731_05_MIT

MIT、組織に統合された生体工学的膝は自然のうごきを回復できる

MIT の研究者らは、膝上切断をした人が従来の義足よりも簡単に歩き、階段を上り、障害物を避けることができる新しいバイオニック膝を開発した。

断端がソケット内に収まる義肢とは異なり、新しいシステムはユーザの筋肉や骨組織と直接統合されている。これにより、安定性が向上し、ユーザはプロテーゼ(義足)の動きをより細かく制御できるようになる。

小規模な臨床研究の参加者は、従来の膝上切断を受けた人々と比較して、手足が自分の体の一部のように感じられたとも報告した。

「組織と統合されたプロテーゼは、骨に固定され、神経系によって直接制御される。単なる生命のない独立したデバイスではなく、人間の生理学に注意深く統合され、より高いレベルのプロテーゼの具現化を提供するシステムである。それは単に人間が使用するツールではなく、むしろ自己の不可欠な部分である」と、メディア芸術と科学の教授であり、MIT の K.Lisa Yang Center Bionics の共同所長であり、MIT McGovern Institute 脳研究所の準会員であり、新しい研究の上級著者である Hugh Herr はと話している。

Tony Shu PhD '24 は、Science に掲載される論文の筆頭著者。

ベターコントロール

過去数年間、Herr の研究室は、切断後に残された筋肉から神経情報を抽出し、その情報を使用して義肢を誘導できる新しい義肢の開発に取り組んできた。

従来の切断では、交互に伸縮する筋肉のペアが通常切断され、筋肉の正常なアゴニスト(主導筋)とアンタゴニスト(拮抗筋)の関係が破壊される。この混乱により、神経系が筋肉の位置と収縮の速さを感知することが非常に困難になる。

アゴニスト-アンタゴニスト筋神経界面(AMI)として知られる、Herrと彼の同僚によって開発された新しい外科的アプローチを使用して、筋肉ペアは手術中に再接続され、断端内で互いに動的に通信する。この感覚フィードバックは、プロテーゼの装着者が手足をどのように動かすかを決定するのに役立ち、義足の制御に使用できる電気信号も生成する。

2024 年の研究で、研究者らは、AMI 手術を受けた膝下切断の人は、従来の膝下切断を受けた人よりもはるかに自然に歩き、障害物を回避できることを示した。

新しい研究では、研究者らは膝上の切断者により良いサービスを提供するためにアプローチを拡張した。研究チームは、AMI を使用して筋肉からの信号を読み取るだけでなく、骨に統合して、より安定性と優れた感覚フィードバックを提供するシステムを作成したいと考えていた。

これを達成するために、研究チームは切断部位の残存大腿骨にチタン棒を挿入する手順を開発した。このインプラントは、従来のプロテーゼよりも優れた機械的制御と耐荷重を可能にする。さらに、インプラントには体内の AMI 筋肉にある電極から情報を収集する 16 本のワイヤーが含まれており、筋肉からの信号をより正確に伝達できる。

e-OPRA として知られるこの骨統合システムは、AMI 信号をこの研究のために特別に開発された新しいロボット コントローラに送

信する。コントローラはこの情報を使用して、ユーザが望むように義足を動かすために必要なトルクを計算する。

「すべての部品が連携して、体内への情報の出し入れを改善し、デバイスとの機械的なインタフェースを改善する」と Shu は言う。「われわれは、不快で頻繁な皮膚感染症につながる可能性のあるソケットを使用するのとは対照的に、負荷をかけるべき体の部分である骨格に直接負荷をかけている。」

この研究では、2 人の被験者が、骨結合型機械神経プロテーゼ (OMP) として知られる AMI と e-OPRA を組み合わせたシステムを受け取った。これらのユーザは、AMI 手術を受けたが e-OPRA インプラントを受けなかった 8 人、および AMI も e-OPRA も受けていない 7 人のユーザと比較された。すべての被験者は、研究室が開発した実験的な電動人工膝関節を順番に使用した。

研究チームは、膝を指定された角度に曲げる、階段を上る、障害物を乗り越えるなど、いくつかの種類のタスクを実行する参加者の能力を測定した。これらのタスクのほとんどで、OMP システムを使用しているユーザは、AMI 手術を受けたが e-OPRA インプラントを受けなかった被験者よりも優れたパフォーマンスを示し、従来のプロテーゼを使用したユーザよりもはるかに優れていた。

「この論文は、科学界が長い間抱いてきたビジョン、つまり完全に生理学的に統合され、意志的に制御されるロボット脚の実装と実証の実現を表している」と、Vanderbilt 大学の機械工学教授でインテリジェントメカトロニクスセンタ所長、Michael Goldfarb は言うが、この研究には関与していない。「これは本当に難しい仕事であり、著者らはこのような困難な目標を実現するための努力を称賛に値する。」

具現感覚

研究チームは、歩行やその他の動きをテストすることに加えて、参加者の身体化感覚、つまり義肢が自分の体の一部のようにどの程度感じられるかを評価することを目的とした質問も行った。

質問には、患者が2本の足を持っているように感じたかどうか、プロテーゼが体の一部であるように感じているかどうか、プロテーゼをコントロールしていると感じているかが含まれていた。各質問は、参加者の主体性、デバイスの所有権、身体表現の感情を評価するように設計されている。

研究チームは、研究が進むにつれて、OMPの2人の参加者が他の被験者よりも主体性と所有権の感覚がはるかに大きく増加していることを発見した。

「この論文が重要なもう一つの理由は、これらの具体化の問題を調査し、具体化の感覚が大幅に改善されたことを示している。ロボット義足のAIシステムがどれほど洗練させても、ユーザにとっては外部デバイスのツールのように感じられる。しかし、この組織統合アプローチでは、人間のユーザに自分の体とは何かを尋ねると、それが統合されればされるほど、プロテーゼは実際には自己の一部であると言うようになる」(Herr)。

AMI手術は現在、Brigham and Women's 病院で膝下切断患者に対して日常的に行われており、Herr は、これが間もなく膝上切断の標準になると予想している。統合されたOMPシステムは、商業利用のFDA承認を得るには大規模な臨床試験が必要であり、Herr は約5年かかる可能性があると予想している。



図:新しいバイオニック膝は、膝上を切断した人が従来の義足よりも簡単に歩き、階段を上り、障害物を避けるのに役立つ。新しいシステムは、ユーザの筋肉や骨組織と直接統合されている(下段右)。これにより、安定性が向上し、ユーザはプロテーゼの動きをより細かく制御できるようになる(Credits:Credit: Courtesy of the researchers; MIT News)。