

柔軟ラティス構造を活用したワイヤ駆動人工筋肉で構成される 人体模倣脚の製作

吉村 駿之介 鈴木 天馬 佐原 侑太 河原塚 健人 岡田 慧 (東京大学)

1. はじめに

柔軟素材のラティス構造でワイヤを覆うことで構成される、任意形状・安定動作かつ環境接触が可能なワイヤ駆動人工筋肉である、筆者らが提案した柔軟ラティス構造筋肉 PSM[1] は、解剖学を基にした身体構造を有する人体模倣ロボットにおける活用が期待される。そこで本研究では、人体の 3D モデルおよび解剖学をもとに、人間の骨格・関節構造・筋配置を再現したロボットの脚 (図 1) を作成し、PSM により駆動しその動作を確かめる。

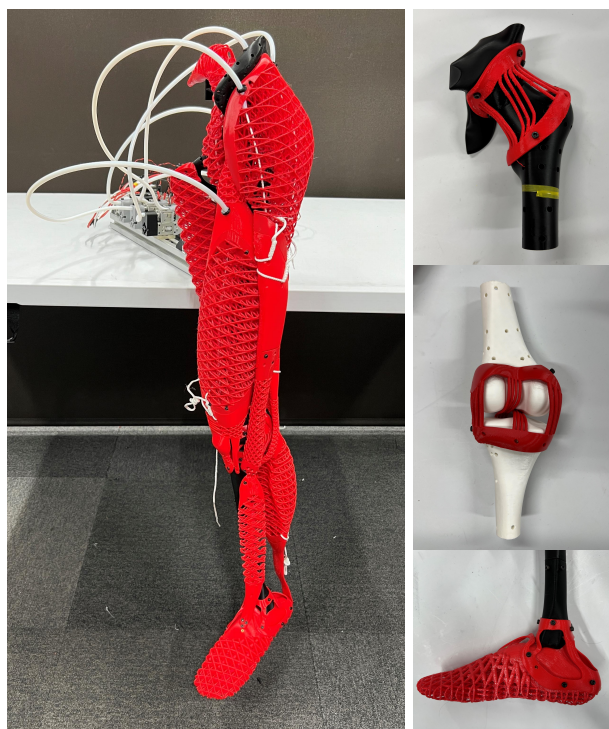


図 1 3D プリント・組み立て後の人体模型脚およびその関節構造

2. 柔軟ラティス構造筋肉を活用した 人体模倣脚の設計

人体模倣脚の設計要件として、骨格および外形が人間に近い形状であること、各関節が人間の関節同様に骨・靱帯による動作拘束メカニズムを持つこと、筋肉が柔軟ラティス構造筋肉で構成されることを挙げて、片足のモデルを設計した。全ての冗長筋肉の実装が、アクチュエータのサイズ・重量を考慮すると困難であるため、A. 股関節の伸展および膝関節の屈曲, B. 股関節の内転, C. 股関節の屈曲, D. 股関節の屈曲および

膝関節の伸展, E. 股関節の外転, F. 膝関節の屈曲および足関節の底屈, G. 足関節の背屈, といった筋肉の主要な役割により分類し、同分類内の筋は合体して 1 つの柔軟ラティス構造筋肉とした。また、それらは必要に応じて、多自由度筋として実装した。筋形状および骨形状の参考として、人体の 3D モデル [2] を基に設計を行った。柔軟ラティス構造筋肉のパターン構造を生成した CAD モデルを図 2 に示す。また、股関節・膝・

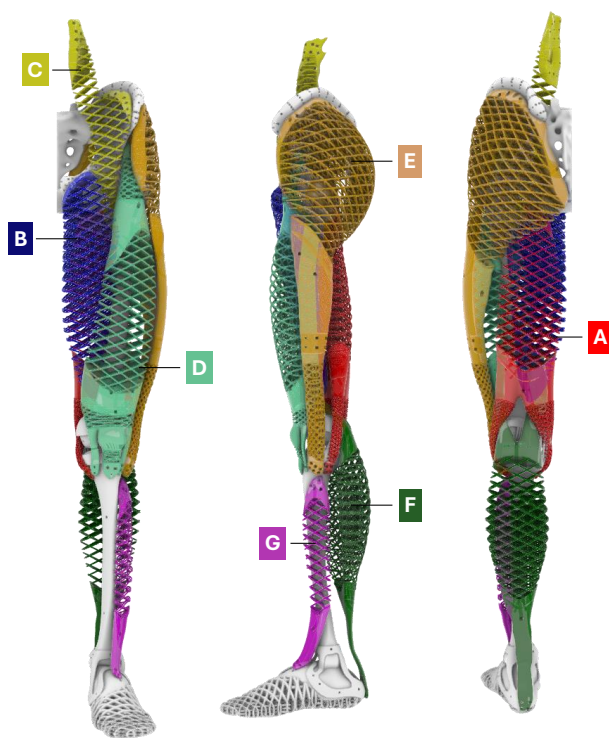


図 2 人体模倣脚の CAD モデル

足首それぞれ、靱帯により運動が拘束される模倣型関節を製作した。材料として、骨は PLA, 靱帯は柔軟素材 TPU95A を使用した。なお、今回腓骨は簡略化のため省略した。これらの靱帯を図 3 に示す。



図 3 股関節・膝関節・足関節の骨格および靱帯

以上の、骨格・関節および筋肉の等身大モデルを、PLA または TPU95A を材質として、全て 3D プリントにより印刷した。モータ・回路は [1] と同様のものを使用し、PTFE チューブでモータから脚へワイヤを伝達した。完成した左足の全体像および関節構造を図 1 に示す。

3. 柔軟ラティス構造筋肉を活用した 人体模型脚の動作

製作した人体模型脚について、筋を収縮させ単純動作を行わせる。今回、5 つの柔軟ラティス構造筋肉 (A, C, D, E, F) について、合計 6 つのモータ・ワイヤをつけて駆動を行わせた。なお、残りの 2 つの柔軟ラティス構造筋肉 (B, G) は駆動せず、受動弾性のみにより動作を拘束する。動作として、1. 股関節の屈曲、2. 股関節の伸展、3. 膝関節の屈曲、4. 足首の底屈、5. 股関節の外転を行った。これらの動作を図 4 に示す。

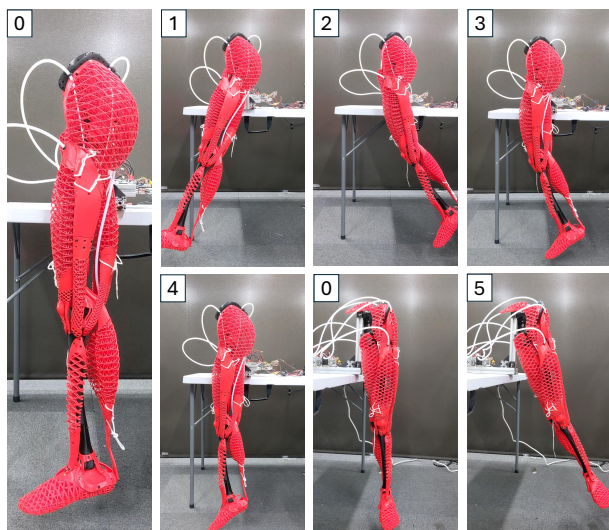


図 4 模倣脚の動作実験。0 は初期姿勢，1 から 5 は各動作番号に対応する。

1. 股関節の屈曲では、D. 股関節の屈曲および膝関節の伸展筋および、C. 股関節の屈曲筋、E. 股関節の外転筋のうち、前方に位置するワイヤを収縮することで、股関節を 30 度屈曲させた。筋 D が股関節だけでなく膝関節の伸展にも関与することおよび、筋 B は力を緩めていることにより、膝関節が伸展しきった状態での股関節屈曲が達成されている。2. 股関節の伸展では、A. 股関節の伸展および膝関節の屈曲筋を収縮することで、股関節を 30 度伸展させた。筋 A が膝関節にも関与するために、膝関節にもわずかな屈曲がみられるが、初期姿勢が直立状態であるため、股関節のモーメントアームが大きく、股関節の運動が優先される。3. 膝関節の屈曲では、C. 股関節の屈曲筋の駆動により股関節の伸展を防ぎながら、A. 股関節の伸展および膝関節の屈曲筋を収縮することで、膝関節のみの 30 度の屈曲を行った。4. 足首の底屈では、F. 膝関節の屈曲および足関節の底屈筋を収縮することで、足首を 30 度底屈させた。筋 D も緊張させることにより、膝関節の屈曲を防ぎ、足首のみの底屈動作が達成されている。5. 股関節

の外転では、E. 股関節の外転筋を収縮することで、股関節を 30 度外転させた。筋 E には 2 つのモータ・ワイヤを用いているため、張力に余裕のある外転動作が達成されている。

いずれの動作においても、人体の可動域と比べて、この模倣脚の可動域は小さい。この 1 つ目の理由として、骨・筋腱の固定部が固く、運動を阻害していることが考えられる。骨は PLA、筋腱は TPU で印刷し、それらはねじによって固定されている。この固定部が、人体における骨・腱の接合部と違い、大きくかつ固いため、関節を動かす際に大きな筋張力が必要となってしまう。この改善策として、複数材料の一体成型等による骨・筋腱の固定方法の変更や、腱部分の設計改善が必要である。2 つ目の理由として、モータから脚へとワイヤを伝達する際に使用している PTFE チューブの強度が低く、数十 N 程度の張力を加えると変形が発生することが挙げられる。張力を大きくすると、変形はさらに大きくなり、チューブ内部の摩擦も大きくなる。結果として、モータから筋までの張力の伝達効率が低くなるため、モータの性能を十分に発揮できず、モータに大きな電流を流しても、筋には弱い収縮力しか発生させられない。この改善策として、ワイヤ伝達経路を短く直線的にし、チューブを極力使わない、あるいはチューブが変形しないよう固定することが挙げられる。

また、行った動作の多くは、複数の多関節筋の干渉動作による、複数関節にわたる屈曲・伸展である。このような多関節筋で構成される身体においても、筋を適切に選んで収縮・弛緩させることで、特定の関節のみの動作を達成可能であることが示された。

これらの動作を通して、柔軟ラティス構造筋肉が、模倣型骨格・関節構造・筋配置において利用可能であることが示された。

4. 結論

本研究では、柔軟ラティス構造筋肉を活用した人体模倣脚の製作を行った。人間の骨格・関節構造・筋配置を再現したロボットの脚を作成し、柔軟ラティス構造筋肉により駆動し動作を確かめた。製作した脚は、人体と比べて可動域が小さいものの、柔軟ラティス構造筋肉による模倣型身体の動作が可能であることが示された。また、多関節筋の干渉動作による複数関節にわたる屈曲・伸展も可能であることが示された。今後の展望として、ハードウェアの改善を通じた可動域の拡大、2 脚への拡張、接触のセンシングの実装を目指す。

参 考 文 献

- [1] Shunnosuke Yoshimura, Akihiro Miki, Kazuhiro Miyama, Yuta Sahara, Kento Kawaharazuka, Kei Okada, and Masayuki Inaba. Patterned structure muscle: Arbitrary shaped wire-driven artificial muscle utilizing anisotropic flexible structure for musculoskeletal robots. In *Proceedings of The 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2024.
- [2] Nobutaka Mitsushashi, Kaori Fujieda, Takuro Tamura, Shoko Kawamoto, Toshihisa Takagi, and Kousaku Okubo. Bodyparts3d: 3d structure database for anatomical concepts. *Nucleic acids research*, Vol. 37, No. suppl.1, pp. D782–D785, 2009.