

## [研究助成 (C)]

## 高齢者の躓き予防に向けた関節間協調性を高める ワイヤ駆動型歩行訓練ロボットの開発

Gait training robot for trip prevention improving toe control ability

2177006



研究代表者

早稲田大学大学院  
創造理工学研究科  
(助成受領時：早稲田大学大学院 博士後期課程)

特別研究員

三宅太文

### [研究の目的]

近年、高齢化により、歩行機能を高める歩行訓練ロボットが求められている。特に、歩行時に生じる高齢者の大きな問題の一つがつまずきによる転倒であるため、つまずき予防訓練が重要である。

歩行訓練の効率化のためには、訓練者に対し新しい歩容へと誘導しつつ能動的な歩行動作を促す必要がある。そのために、人の歩容に調和可能なロボットの適応的な介入手法が求められる。適応的に介入するには、人の歩行動作を阻害せず、必要時のみにロボットが人の動きに介入する必要がある。既存のロボットでは、能動的な歩行動作の阻害をしないために、人の動きに応じて接触力を調整する等の適応的な介入手法の研究がなされている。しかし、つまずき予防に必要なつま先の制御能力向上を促すための歩行訓練ロボットの的方法論は確立されていない。

歩行時につまづかないためには、遊脚期の最小つま先高さの制御が重要となる。人は、関節間協調性により、最小つま先高さのばらつきを抑えるように歩行動作を制御している。従って、最小つま先高さのばらつきを抑える制御能力の向上が必要である。

最小つま先高さの制御能力向上を目的とし、つまずきを発生させるロボットとつまずきを回避するようにアシストするロボットの2つのロボットシステムを開発した。そして、2種類の

異なるロボットの介入方法を実践することで、機械が人間とどのように協調することで人間のつま先制御能力の向上を促せるのかを明らかにすることを目指した。

### [研究の内容、成果]

#### 研究概要

歩行訓練ロボットには、動作アシストにより目標とする歩行動作へと誘発することで歩行能力の向上を促す手法と外乱を発生させて人にバランス回復を強制することで歩行能力の向上を促す手法が存在する。本研究では、ケーブル駆動型のハードウェアシステムにより、遊脚期時の最小つま先高さが低下した場合にアシストを行う歩行訓練ロボットと遊脚期につま先の動作を阻害しつまずきを発生させる歩行訓練ロボットの開発を行った。そして、開発したそれぞれの的方法論が人の最小つま先高さの制御へ与える影響を調査した。

#### 研究方法

##### 1. 最小つま先高さ予測に基づくアシスト

最小つま先高さが低下した時のみアシストを実施する歩行訓練ロボットシステムを開発した。このシステムの実現のために、介入度合いを調整可能なつま先動作のアシスト手法、最小つま先高さの予測手法の2つの手法を構築・検証した。

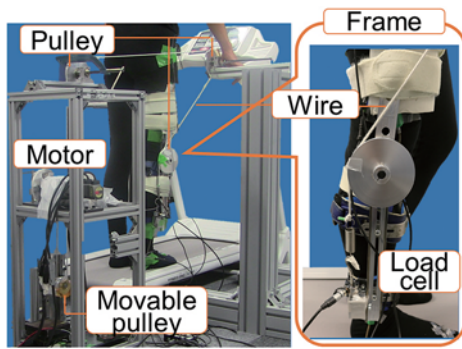


図1 アシストロボットの概観

まず、接触力を調整可能な経路長補償機構を有するケーブル駆動型のハードウェア（図1）を開発し、通常時は外力を印加せず、必要に応じて外力を印加する手法を確立した。ケーブルはロードセルとばねと連結して下腿部に取り付けられ、モータによりケーブルを巻き取ることで膝屈曲トルクを生じるように外力が印加され、つま先を持ち上げるアシストがなされる。

アシストにより最小つま先高さの分布に影響を与えるためには、事前に最小つま先高さを予測する必要がある。下肢関節角度から歩行相を検出し、位相の角度情報により最小つま先高さを予測するアルゴリズムを考案した。遊脚時の歩行動作は蹴りだし時のエネルギーによって生成されるため、遊脚開始時の角度情報から同周期のつま先情報が予測できると考えた。そこで、下肢三関節角度空間上の幾何的な特性により遊脚開始時を検出し、さらに微分により角速度と角加速度を導出することで9つの入力データを抽出した。そして、入力データにノイズが含まれていることを考慮し、ガウス関数を用いた動径基底関数ネットワークにより最小つま先高さを予測する手法を構築した。

以上の技術を組み合わせ、つま先離床時の最小つま先高さの予測値が分布の下位の値の場合に、モータを回転させつま先を持ち上げる外力を印加し、予測値が分布の上位の値であれば、モータを停止し外力を印加しない手法を確立した。

8名の若年被験者において、トレッドミル上

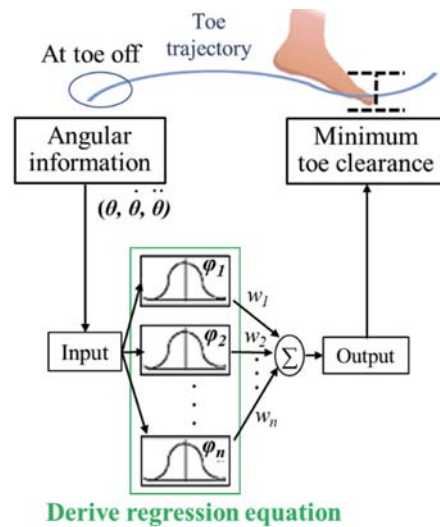


図2 最小つま先高さ予測アルゴリズム

で歩行した際の歩行訓練ロボットのアシストの効果を検証した。モーションキャプチャシステムによりつま先位置、装着型ゴニオメータにより角度を計測した。まず、5分間の歩行時の角度とつま先高さのデータを訓練データとし、最小つま先高さの分布の獲得及び予測アルゴリズムの学習を行った。テストデータとして100周期分のデータを使用したところ、最小つま先高さを2.3 mmほどの誤差で予測できた。そして、予備実験で定めた張力16 Nを目標値とし、最小つま先高さ予測に基づいた断続的なアシストを2分間行った。アシスト終了直後2分間において、アシスト前の2分間のデータと比較し、被験者全体において最小つま先高さの分布の下位の値（最小値と第1四分位数）が有意に増加した。分布上位の値（最大値と第3四分位数）は訓練後に有意に増加しなかった。しかし、男性の被験者4名ではばらつきが低下（-47%）したのに対し、女性の被験者4名では増加（+200%）となり、訓練効果には依然として個人差があった。女性の被験者に限定し結果を解析すると、アシスト前後では最小つま先高さに差がない傾向がみられた。

図3と図4に男性被験者と女性被験者それぞれ1名のアシスト前、中、後の最小つま先高さの分布を記す。今回の実験ではアシスト力を一

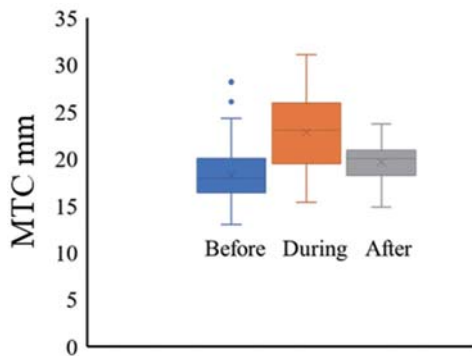


図3 アシスト時、アシスト前後の最小つま先高さ (MTC) 変化 (男性被験者)



図5 つまづき外乱印加ロボット

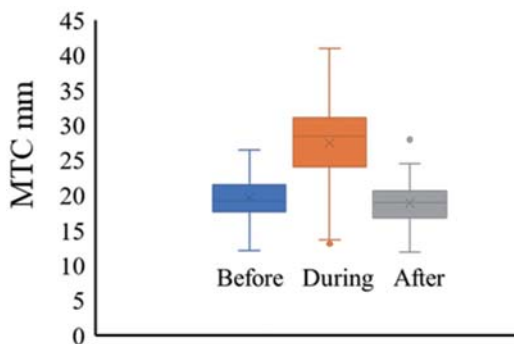


図4 アシスト時、アシスト前後の最小つま先高さ (MTC) 変化 (女性被験者)

定としていたため、アシスト力が体重の軽い女性被験者群には不自然な歩容を強制するほどの強さであり、能動的な歩行動作を促すことができなかつた可能性がある。全体的な傾向としては、予測に基づき最小つま先高さの低下を妨げた結果、人に最小つま先高さ分布の下位の値を高くする制御動作を促すことができた。

## 2. つまづき外乱

イタリアの Scuola Superiore Sant'Anna (聖アンナ高等研究所) と共同でつまづきを発生させるロボットを開発し、つまづき経験後の人のつま先制御状態を調査した。歩行時に外乱を発生させると身体のバランスが崩れるため、歩行状態を維持するために人は崩れたバランスを回復させる必要性が生じる。そして、繰り返し外乱に曝されると人は外乱に対し頑健で適応した動作を獲得する。そこで、つまづきを繰り返し人に経験させることでつまづきを回避するように人が動作を獲得することが可能であると考え

た。

図5に示すように、ケーブルを足に装着し、通常時にはケーブルが前後に動くことで歩行を阻害しない状態を維持している。モータを駆動した場合に、カムによりケーブルの動きが停止し、足の前進を妨げる力が発生する。本システムでは、詳細な歩行相検出は必要としないため、フィルム型力センサにより左足の接地状態を計測することで、右足が遊脚中であるかどうかを判定した。つまづきのタイミングはランダムに決定することで、被験者がつまづきの発生を予測できないようにした。

14名の若年被験者において、トレッドミル上での歩行時につまづき外乱を発生させる実験を行った。2分後の通常状態での歩行を計測した後、つまづき外乱を30回発生させ、その後2分間の通常状態での歩行を計測した。

つま先と踵の位置情報をモーションキャプチャシステムにより計測し、最小つま先高さの平均と標準偏差を導出した(図6)。外乱発生前後の通常状態の歩行を比較した結果、最小つま先高さの平均と標準偏差の低下が確認された。最小つま先高さの標準偏差の低下は、ばらつきを抑える制御性能の高い歩行になったことを意味すると言える。一方で、最小つま先高さの平均の低下は、つまづきのリスクの増加とみなすことができる。人の運動制御は須らく環境との関わりでなされる。本システムの歩行では、つま先高さの大小に関わらずつまづきが生じてし

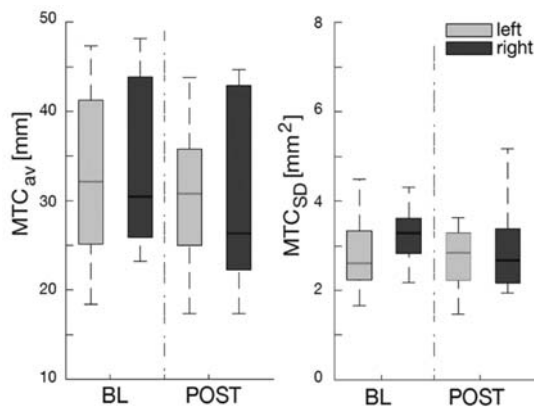


図6 印加前 (BL) と外乱印加後 (POST) における最小つま先高さ (MTC)

まう環境であるため、つまずき後の転倒を回避するように人が適応した結果、最小つま先高さが低下した可能性がある。つまずき時に人がバランス回復のために行う動作の一つが遊脚中の足の素早い接地である。最小つま先高さの低下は、地面までの距離が短くなることを意味しており、つまずき時により素早い接地が可能となる。

つまずき外乱を与えた右足に対し、左足の変化は小さかったことから、被験者は右足側につまずきが来ることを理解し、右足を中心につまずき外乱へ適応したと考えられる。

予測に基づくアシスト手法と比較し、つまずき外乱を与える手法はより安定に最小つま先高さのばらつきを抑えることができる傾向にあった。一方で、つまずき外乱を与える手法は、つまずきの回避よりもつまずき後の転倒を回避することを強く人に促すため、つまずきを回避するように人を誘導するのは現状では困難であると考えられる。つまずかないつま先高さを維持することもつまずいた際にすぐにバランスを回復できるつま先高さを維持することもどちらも重要な要素であるため、2つの手法を組み合わせた歩行訓練システムを構築することが重要である。

#### [今後の研究の方向, 課題]

動作アシストと外乱印加の両方の観点で歩行訓練ロボットを開発してきた。今後は、2つの手法を組み合わせた歩行訓練ロボットシステムを考案する。そのために、人の歩行状態に応じて、動作アシストと外乱を適切に選択する手法の開発が必要となる。また、人の歩行動作は環境との関わりの中で生成されるため、より広範な環境を再現した上で介入手法を検討することが重要である。特につまずきはつま先が低下した場合に生じるので、実際の障害物環境を想定し、つま先高さが一定以下でつまずきを与えるなどの工夫が有益である。

#### [成果の発表, 論文等]

- [1] Tamon Miyake, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Prediction Algorithm of Parameters of Toe Clearance in the Swing Phase," *Applied Bionics and Biomechanics*, Volume 2019, Article ID 4502719, 2019.
- [2] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "One-DOF Wire-driven Robot Assisting Both Hip and Knee Flexion Motion," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 31, No. 1, pp. 135-142, 2019.
- [3] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Effect of the Timing of Force Application on the Toe Trajectory in the Swing Phase for a Wire-driven Gait Assistance Robot," *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 17-00660, 2018.
- [4] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Intermittent Force Application of Wire-driven Gait Training Robot to Encourage User to Learn an Induced Gait," *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 433-438, 2018.
- [5] Tamon Miyake, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Prediction of Minimum Toe Clearance with a Radial Basis Function Network at the Start of the Swing Phase," *Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1664-1667, 2018.