

# 人間特性計測に関する研究

研究代表者 菅野 重樹  
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

## 1. 研究課題

本研究では人間特性計測システムを用いて、医療福祉ロボット、パートナーロボット、コンピュータグラフィックスなどのヒトの動作解析に基づいたアプローチが必要となる研究領域において、人間中心設計の方法論の確立を目指す。開発してきた装置・アルゴリズムを使用及び評価をしていくことで、個々に適応するためのシステムの在り方を研究している。本研究室では人間特性計測に関する研究として、「歩行時の最小つま先高さの予測に基づく歩行訓練ロボットの制御」の研究があり、生体指標の解析に基づく人の動作状態や人の動作意図の推定により、ヒトの動作に対し適応的に介入することでヒトの動作制御能力の向上を促すロボット技術の開発を進めている。本年度の研究成果を次節より報告する。

歩行は日常生活を送る上での重要な役割の一つであり、健康長寿社会実現のために、歩行能力の維持を促す取り組みが不可欠である。歩行時の転倒による怪我は、加齢に伴い生じる深刻な問題である。歩行時の転倒の主な要因はつまずきであることから、つまずき予防が重要と言える。つまずきを回避する能力の指標として、遊脚期の最小つま先高さ(MTC)の制御能力がある。任意のタイミングでMTCが低下するとつまずきの可能性が生じるため、MTCの低下を防ぐようにMTCの制御性の高い歩行を促すことが必要である。

歩行動作アシストロボットによって直接的に動作を教示することは、歩行訓練の効率化に有効である。その際、人に動作の学習を促すために、人の能動的な動作を誘発することが不可欠である。先行研究では、リハビリテーションへの応用を念頭に置き、必要に応じてアシスト力を調整することで能動的な人の動作を誘発する手法が研究されている。しかし、既存の手法では、MTCに基づいて適応的にアシスト頻度を調整することができず、MTCの制御性の高い歩行動作を誘発することは困難である。MTCの制御性の高い歩行動作を誘発するためには、MTCを予測し、MTCに応じてアシストロボットの介入頻度を調整することが必要である。

## 2. 主な研究成果

### 2.1 システム

MTCを予測し、予測値が一定値以下の時のみにアシストする歩行訓練ロボットシステムを開発した。図1にシステムの構成を示す。ゴニオメータ(SG 150, Biometrics Ltd., Newport, UK)に下肢関節角度を計測し、コントローラによりリアルタイムにデータを処理することで歩行相を導出した。ゴニオメータの計測誤差は $\pm 2$  [°], 計測精度が0.5%以上である。歩行相検出に基づき、歩行訓練ロボットがMTCの予測やアシストを実施した。

必要に応じて介入を行うにはアシストのオンオフを切り替えられることが必須であるため、ワイヤ駆動型形式のハードウェアを開発し、断続的にアシストをする手法を実現した。図1にハードウ

エアの外観図を示す。歩行訓練を対象としているため、人はトレッドミル上を歩行しており、トレッドミル外に設置した電動サーボモータ(NX610MA-PS25; Oriental Motor Co., Tokyo, Japan)によりワイヤを巻き取ることで歩行時の人の足を持ち上げるアシストを印加した。この時、人が装着しているフレーム下腿部に取り付けたロードセル(LUX-B-200N-ID; Kyowa Electronic Instruments Co., Tokyo, Japan)により、ワイヤの張力情報を取得した。人へ外力を印加しない際は、モータを回転させないことでワイヤ張力が印加されないようにし、印加する際は、つま先離床から膝が屈曲動作をしている間に、モータを回転させワイヤ張力が印加されるようにした。

リアルタイムにMTCを歩行訓練ロボットのアシストで修正するためには、MTCが低下したタイミングを事前に検出する必要がある。そこで、図2に示すように、アシストを開始する必要があるつま先離床時においてMTCを予測するアルゴリズムを構築した。ガウス関数の線形和である放射基底関数ネットワークを用い、つま先離床時の股関節、膝関節、足関節角度、角速度、角加速度を入力値とした。角度は計測値であり、角速度と角加速度は角度を微分することで導出した。ネットワークの学習は個人毎にアシスト前に行うこととし、5分間のトレッドミル歩行時のMTCとアルゴリズム入力値のデータセットを取得した。データセットのMTCの周期間の平均値を基準とし、その基準よりMTC予測値が低い場合にアシストを行うようにアルゴリズムを実装した。

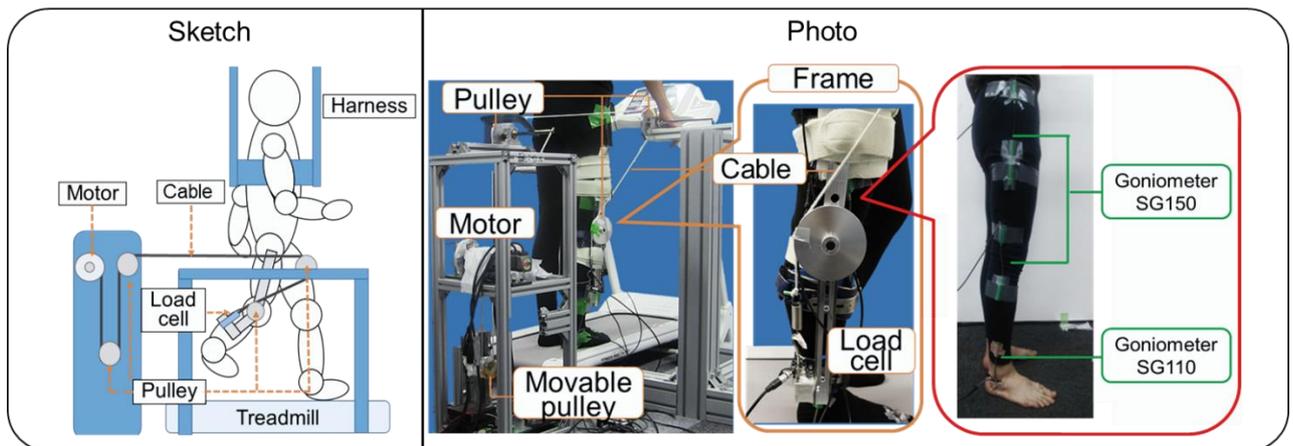


図1 歩行訓練ロボットの外観図

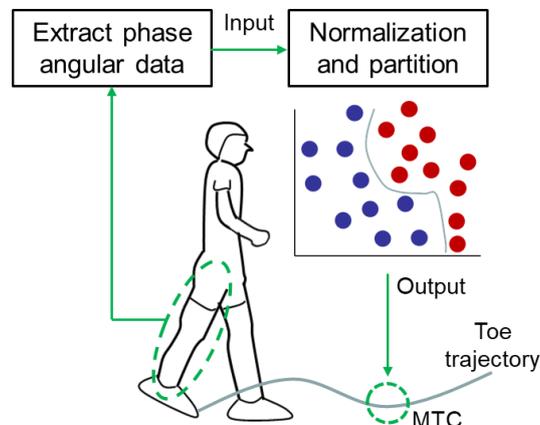


図2 MTC予測アルゴリズムの概念図

## 2.2 実験手法

9名の被験者（男性5名，女性4名）において本提案手法に基づく歩行訓練ロボットのアシストの効果を検証した．予測アルゴリズムの学習用と予測アルゴリズム実装した歩行訓練ロボットの効果検証用のデータ取得のために，実験タスクとして，被験者はトレッドミル歩行を行った．まず，被験者は，5分間のトレッドミル歩行を行い，自分の好みの歩行速度 ( $2.5 \pm 0.27 \text{ km/h}$ ) を決定した．次に，被験者がトレッドミル上で400秒間の歩行を行い，予測アルゴリズムの学習用のデータを計測した．アルゴリズムの訓練に約200個のデータセットを使用し，訓練結果を評価するために100個のデータセットを使用した．アルゴリズムのネットワークに2-20個のガウス関数を用い，最も精度の高いガウス関数の数を採用した．その後，被験者が270秒間トレッドミル上を歩行した．歩行開始から30秒経過してからの120秒間を歩行訓練ロボットが断続的に介入する期間とした．MTCが平均値よりも低くなると予測した場合のみ，歩行訓練ロボットがアシスト力を印加した．そして，最後の120秒間は，歩行訓練ロボットの介入がない状態とした．

歩行時のつま先高さの座標を光学式モーションキャプチャシステム (Raptor-E; Motion Analysis, Santa Rosa, CA, USA) を用いて高精度 (0.01mm 単位) で取得し，このデータを評価指標として用いた．最初の5分間の任意の90データをロボット介入前のデータとし，270秒間の歩行タスクの最後の120秒間の90データをロボット介入後のデータとし，介入によるMTCの変化を解析した．各被験者において，MTCの分布の変化を分析するために，MTCの最小値と第1四分位値を求めた．MTCの最小値と第1四分位値に関してt検定により有意差検定を行い，低いMTCの値が提案するアシスト手法によって増加するかどうかを評価した．第一四分位値と第三四分位値は，それぞれデータの最低値と最高値の25%の値を示した．

## 2.3 実験結果と考察

まず，5分間の歩行データに基づくMTC予測アルゴリズムの学習結果として，MTCの100データに対し，2.3mmほどの誤差であった．図3に示すように，歩行訓練ロボットで断続的なアシストを2分間行った結果，アシストを終えた後の2分間において，アシスト前の2分間に対し，MTCの分布の下位の値（最小値と第1四分位数）を有意に増加させることができた．他方，MTCの上位の値（最大値と第3四分位数）は有意に増加しなかった．以上より，MTCの下位の値を予測し，外的にMTCの低下のみを妨げるようなアシスト手法は，MTCの制御性の高い歩行動作を人へ促す効果があると考えられる．

一方で，被験者群の違いに基づくアシスト効果の個人差が確認された．MTCの四分位数間の変化率が，男性群では約-47%と減少しているのに対し，女性群では約200%の増加が確認された．男性群と女性群からそれぞれ1名のMTCのデータを箱ひげ図として図4に示した．この傾向の差は，体格な違いが影響しているものと考えられる．男性に対し女性の方が体重が小さいため，ロボットのアシスト力が同じであっても，女性の方がより高く足を持ち上げられる．断続的なアシスト力が印加されている期間におけるMTCの第3四分位値や最大値が大きかった試行では，アシスト終了後の期間におけるMTCの下位の値が小さい傾向にあった．つまり，アシストによって足が持ち上げられた高さがより大きかった試行では，アシスト終了後にMTCの下位の値の増加率が低い傾向であった．MTCの下位の値が大きくなり，四分位数間の変化率が減少している方がより制御性の高い歩行と言えるが，アシスト力が過剰である場合に，アシスト終了後の制御性が向上しない可能性が考えられる．制御性の高い歩行動作を促す上で，個人毎に適切なアシスト力の範囲がある可能性がある．従って，今後の課題として，ユーザの体格に合わせて力の強さを適応的に調整する手法を確立するこ

とが重要である。

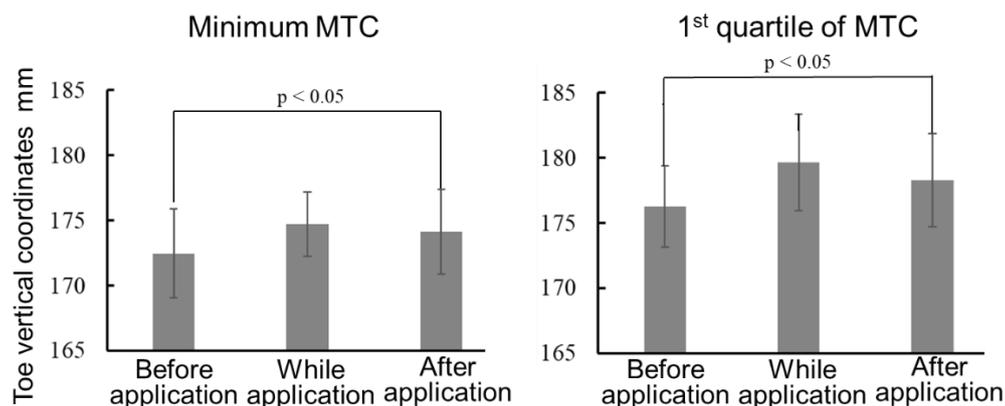


図3 アシスト介入中とその前後におけるMTCの下位の値の変化

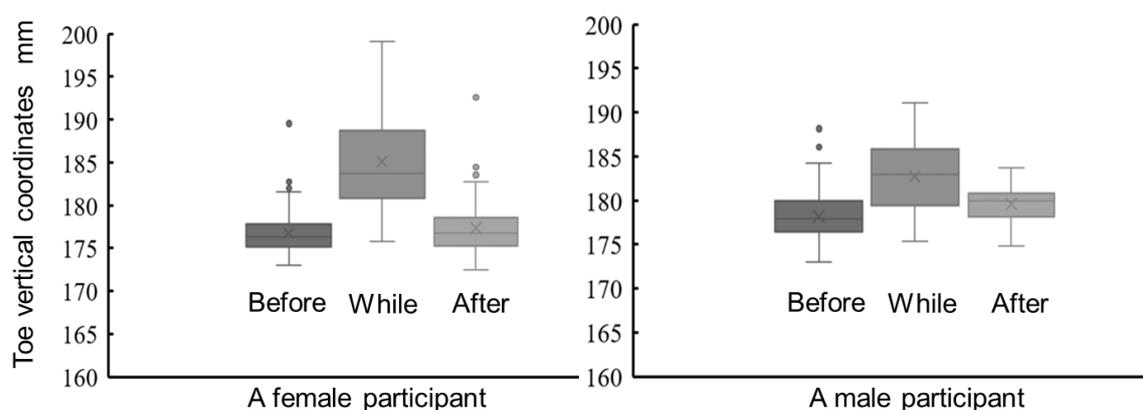


図4 アシスト介入中とその前後におけるMTCの箱ひげ図

### 3. 研究業績

#### 4.1 学術論文

- [1] Tamon Miyake, Federica Aprigliano, Shigeki Sugano, Silvestro Micera, Vito Monaco, "Repeated exposure to tripping like perturbations elicits more precise control and lower toe clearance of the swinging foot during steady walking," *Human Movement Science*, Vol. 76, 102775, 2021.
- [2] 若生然太, 三宅太文, 菅野重樹, "骨盤の動きを考慮したバックパックの可動式ランバーパッドの提案", *人間生活工学(Journal of Human Life Engineering)*, vol. 22, pp. 44-49, 2021.
- [3] Tamon Miyake, Shintaro Yamamoto, Satoshi Hosono, Satoshi Funabashi, Zhengxue Cheng, Cheng Zhang, Emi Tamaki, Shigeki Sugano, "Gait Phase Detection Based on Muscle Deformation with Static Standing-Based Calibration," *Sensors*, vol. 21, 1081, 2021.
- [4] Tamon Miyake, Yo Kobayashi, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Gait event detection based on inter-joint coordination using only angular information," *Advanced Robotics*, vol. 34, pp. 1190-1200, 2020.

#### 4.2 総説・著書

特になし

#### 4.3 招待講演

特になし

#### 4.4 受賞・表彰

特になし

#### 4.5 学会および社会的活動

[1] Tamon Miyake, Mohammed Al-Sada, Tingting Zhong, Wei Wang, Shigeki Sugano, "Feasibility Evaluation of Mixed Reality Obstacles on Treadmill using HoloLens to Elicit Real Obstacle Negotiation," Proceedings of the 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Iwaki, Fukushima, Japan, 2021, pp. 756-761.

[2] Nenta Wako, Tamon Miyake, Shigeki Sugano, "Extraction of shoulder parts to avoid heavy load based on pain while walking with backpack," Proceedings of the 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Iwaki, Fukushima, Japan, 2021, pp. 357-362.

[3] Nenta Wako, Tamon Miyake, Shigeki Sugano, "Investigation of Relationship Between Multi-Point Pressure Stimuli on Shoulder and Overall Pain on Backpack Wearers," Proceedings of the 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Iwaki, Fukushima, Japan, 2021, pp. 363-368.

[4] Tamon Miyake, Masakatsu G Fujie, and Shigeki Sugano, "Gait Training Robot with Intermittent Force Application based on Prediction of Minimum Toe Clearance," Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2020), 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 3416-3422.

[5] Nenta Wako, Tamon Miyake, Shigeki Sugano, "Characterization of shoulder load based on the relationship between interface pressure and pain for backpack shoulder strap design," 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), New York City, NY, USA, 2020, pp. 30-35.

[6] Jing-Chen Hong, Hao Cheng, Yuki Hayashi, Kazuhiro Yasuda, Hiroki Ohashi, Hiroyasu Iwata, "Evaluation of the Effect of High-Dorsiflexion Assistive Robotic Technology on Voluntary Ankle Movement", 8th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob2020), pp. 25-29.

[7] 程 浩, 洪 境晨, 大橋 洋輝, 岩田 浩康, 「背屈支援 RT における支援タイミングの遅延による歩容への影響検証」第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2020) .

[8] 重藤千隼, 大谷拓也, 佐藤丈弘, 水上英紀, 小椋優, 高西淳夫, IMU を用いた溶接動作計測システムに関する基礎検討 日本ロボット学会学術講演会予稿集 38th

ROMBUNNO.2G3-02 Oct.2020.

#### 4. 研究活動の課題と展望

研究により、つまずき予防に効果的な最小つま先高さの制御性の高い歩行動作を人へ促す歩行訓練ロボットのアシスト手法を実現した。一方で、実験を通し被験者群により提案手法による訓練効果に違いがあることが示唆された。今回確認された個人差は、提案システムが体格に応じて適切なアシスト力を調整していないために生じているものと考えられる。従って、ユーザの体格に合わせて力の強さを適応的に調整する手法を確立することが今後の課題である。また、長期的な歩行訓練の効果を検証し、各ユーザの特性に応じ長期的効果が得られる訓練を実現できるような適応的な歩行訓練ロボットの制御手法の開発も目指す。