

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、人の動作状態の計測や人の動作意図を反映する生体指標の解析をすることにより、ヒトの動作予測に基づき適切に介入し、ヒトの動作制御能力を向上可能なロボット技術の開発を目指す。本研究室では人間特性計測として、「歩行時の最小つま先高さの予測」の研究があり、本年度の研究成果を次節より報告する。本項では、その研究の社会背景、特徴、及び課題点を下記に述べる。

歩行は日常生活を送る上で主要な役割を果たし、歩行能力の維持は健康寿命を延ばす上で不可欠である。しかし、加齢に伴い歩行能力が衰えることで、歩行時の転倒により怪我をするという深刻な問題が生じる。歩行能力を向上するための歩行訓練の取り組みが必要である。特に歩行時のつまずきが転倒の主な要因であるため、つまずき予防が重要である。つまずきを回避するためには、遊脚期の最小つま先高さ(MTC)の制御が重要となる。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ヒトへ促すために、MTC の低下を事前に予測する必要がある。

外出環境などの歩行中の MTC を計測するために、ウェアラブルセンサによる MTC 推定手法が開発されている。足に取り付けられた2つの慣性測定ユニット(IMU)の加速度データ等を主に用いて、事後に MTC を推定する手法が一般的である。特に、位置の計算に関して加速度の積分法では大きな誤差が生じるため、機械学習法により MTC を推定する手法が開発されている。MTC の予測手法に関しては、モーションキャプチャーシステムで取得されたつま先の位置を二重微分することで加速度を導出し、ガウス関数を用いた機械学習手法により、最小つま先のクリアランスを予測する手法が実現されている(二乗平均平方根誤差(RMSE): 3.7 mm)。

既存の MTC 予測手法では、コントローラでリアルタイムに処理可能なウェアラブルセンサを使用していないため、最小つま先高さが減少した際に即自的に最小つま先高さを修正させることに制限がある。モーションキャプチャーシステムを使用して入力データを抽出する場合と比較して、ウェアラブル式慣性センサーを使用した場合の推定精度は低い。さらに、既存の手法では、歩行周期間の MTC の変動を処理するには十分な精度でない。MTC の四分位範囲は、若年者の場合は約 4.3 mm、高齢者の場合は約 5.3 mm であると報告されている。50%を超える確率で最小つま先クリアランスの低い値を検出することは、既存の手法では困難である。したがって、ウェアラブルセンサを使用して入力データを取得する形式でより正確な MTC 予測手法の開発に必要である。

2. 主な研究成果

2.1 計測装置

図1に実験装置の構成を示す。関節角度の計測にはゴニオメータ(SG 150, Biometrics Ltd.,

Newport,UK) を使用し, 8 ch アナログ出力アンプ (K800, Biometrics Ltd., Newport, UK) を経由し, コントローラによりリアルタイムにデータを処理が可能となる. ゴニオメータの計測誤差は ± 2 [°], 中継用アナログ入出力アンプの分解能は 13 [bit], 計測精度が 0.5%以上である. つま先高さのデータは, 光学式モーションキャプチャーシステム(Raptor-E; Motion Analysis, Santa Rosa, CA, USA)により高精度 (0.01mm 単位) に計測した.

2.2 アルゴリズム

MTC が低下したタイミングを事前に検出するために, MTC を予測する手法を構築した. ガウス関数の線形和である放射基底関数ネットワーク (RBFN) を用い, MTC 予測アルゴリズムを実現した (Fig. 1). ゴニオメータによりつま先離床時の股関節, 膝関節, 足関節角度を取得し, また, 角度を微分することで角速度と角加速度を導出することで, 9 種類の入力情報を得た. 3 つの関節角度空間上における歩行時の角度軌道は平面構造を持ち, 立脚期から遊脚期へ移行する際に平面の形が変化するため, 平面の切替点を検出することでつま先離床を検出した. リアルタイムで平面の形の変化を計算した場合に切替点の誤検出が発生する可能性があるため, まず 30 歩行周期分の平面の切替点をオフラインで検出し, 切替点が最も多く平面に対し直行する断面を計算することで, 平面の切替点の検出誤差を削減した (Fig. 2). モーションキャプチャーシステムにより取得したつま先高さの情報を正解データとし, RBFN を人毎に学習させた. RBFN の式は下記のように記される.

$$y = \sum_{k=1}^N w_k \exp\left(-\frac{\|x - c_k\|^2}{\sigma}\right) + \gamma \quad (1)$$

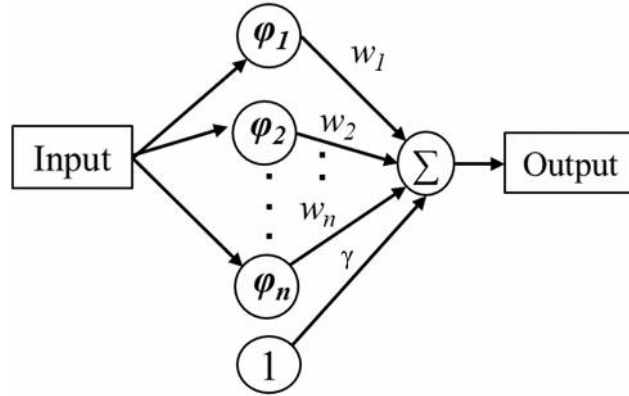


Fig. 1 Structure of radial basis function network (RBFN).

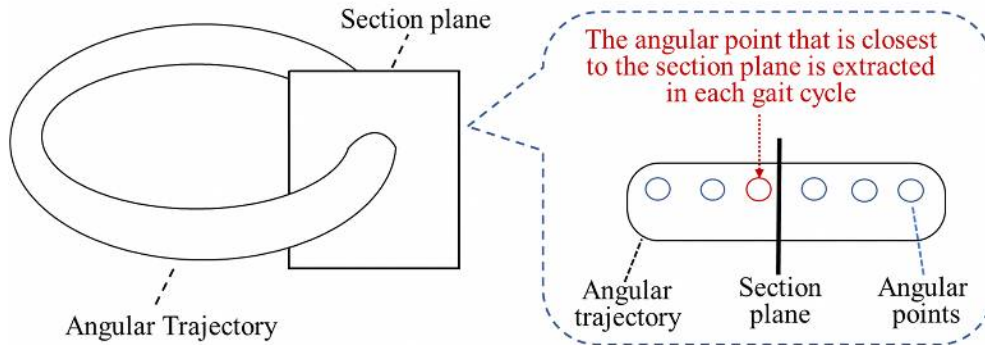


Fig. 2 Extraction method of input values.

2.3 実験手法

6人の被験者がトレッドミル上を歩行した際の関節角度とつま先高さのデータを取得した。2.1 km / h から 3.0 km / h の範囲内において被験者にとって最も快適な速度で 360 秒間歩行した際のデータを計測した。予測精度を向上させるために RBFN に必要な訓練データセットの数を調査した。RBFN の訓練には 20~200 歩行サイクル分のデータセットを使用し、RBFN のテストには 100 歩行サイクル分のデータセットを使用した。RBF ユニットの数は 2 から 20 に設定した。

システムが入力データを抽出した時点から、最小のつま先のクリアランスの時点までの時間を導出した。すべての訓練データの平均時間と標準偏差を計算して、最小クリアランスを事前に予測できたかどうかを評価した。また、RBFN の精度を導出するために、予測値と正解値の RMSE を計算した。そして、トレーニングデータの MTC の平均をゼロとして定義することにより MTC を正規化し、MTC の下位の値（負の値）の検出率を求めた。

2.4 実験結果

まず、入力データの抽出タイミングに関し、最小つま先高さの約 0.2 秒前に取得することができた。次に、MTC の予測結果を Figs. 3-5 に記す。予測値 (Fig. 3 の縦軸) がモーションキャプチャーシステムによる計測値 (Fig. 3 の横軸) に対し比例する傾向が得られた。RMSE は、訓練データの数が増えるにつれて減少する傾向があった。特に、被験者 1, 3, 6 において、訓練データの数が 200 の場合に RMSE が最小となった。他の被験者においては、訓練データの数が 80~180 の場合に RMSE が最小を示した。最小の RMSE の平均は 2.34 mm, 最小値は 1.79 mm であった。RMSE を最小化する RBF ユニットの数は約 5 であった。従って、MTC の予想誤差は、既存手法（事後推定手法も含め）と比較して小さい結果であった。また、MTC の中央値よりも低い値を検出する確率は 68% よりも高く、ランダム検出の確率よりも高く推定可能であることを示した。

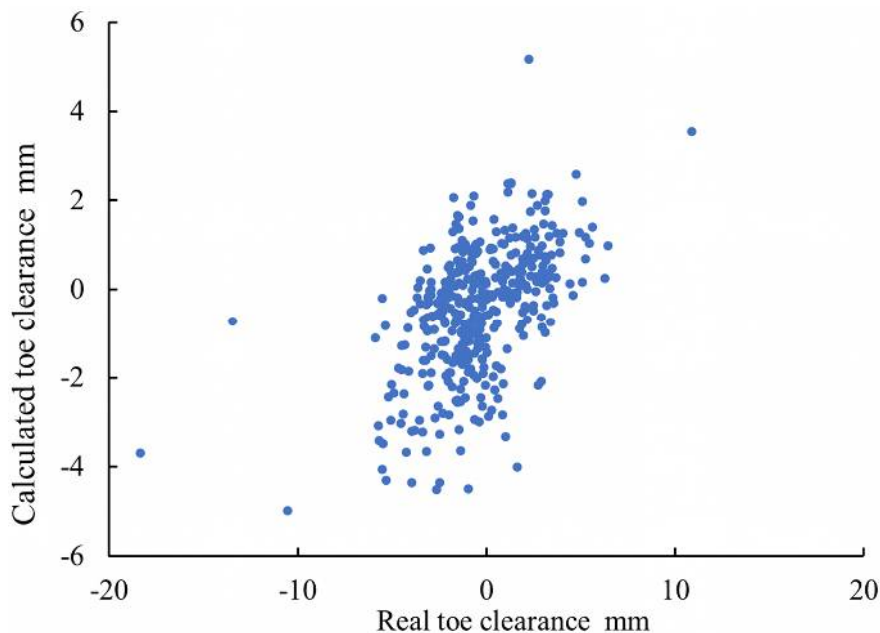


Fig. 3 Example of calculated versus real MTC in training data.

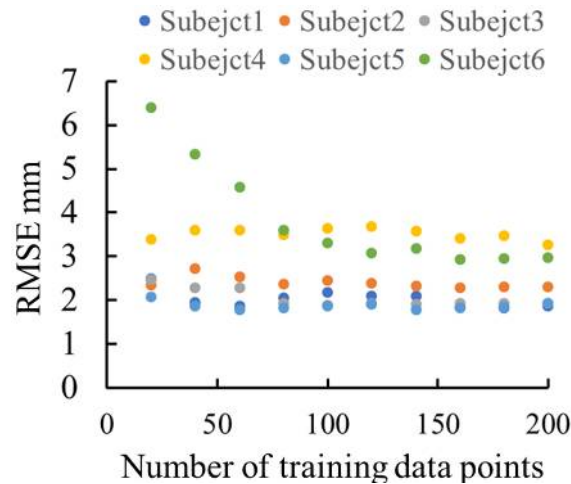


Fig. 4 Prediction result for minimum toe clearance using 100 test gait data

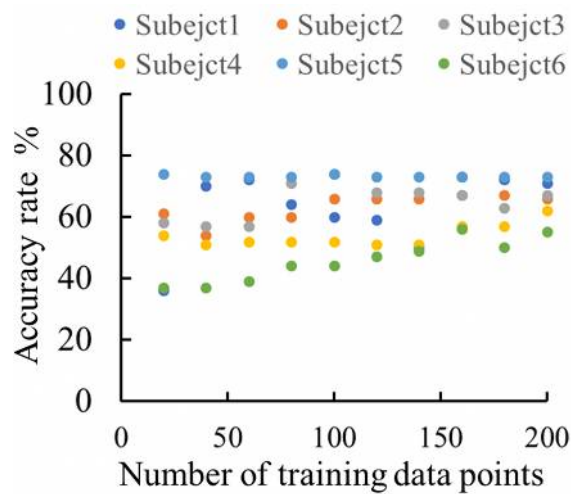


Fig. 5 Prediction result for minimum toe clearance (accuracy rate).

3. 研究業績

3.1 学術論文

- [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] K. Yasuda, Y. Hayahi, A. Tawara and H. Iwata, "Development of a Vibratory Cueing System Using an Implicit Method to Increase Walking Speed in Patients with Stroke: A Proof-of-Concept Study," Robomech Journal, vol.7, no. 1, 2020.
- [3] Ryuya Sato, Mitsuhiro Kamezaki, Satoshi Niuchi, Shigeki Sugano and Hiroyasu Iwata. "Cognitive Untunneling Multi-view System for Teleoperators of Heavy Machines based on Visual Momentum and Saliency," Automation in Construction, Vol.110, 2019.
- [4] K. Yasuda, Y. Hayahi, A. Tawara and H. Iwata, "Using a Vibrotactile Biofeedback Device to Augment Foot Pressure During Walking in Healthy Older Adults: A Brief Report," Frontiers in Psychology, Vol. 10, , 2019.

- [5] K. Kodama, K. Yasuda, N.A. Kuznetsov, Y. Hayahi and H. Iwata, “Balance Training With a Vibrotactile Biofeedback System Affects the Dynamical Structure of the Center of Pressure Trajectories in Chronic Stroke Patients,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 13, 2019.
- [6] Hiroaki Hayashi, Mitsuhiro Kamezaki, Udara E. Manawadu, Takahiro Kawano, Takaaki Ema, Tomoya Tomita, Lollett Catherine, and Shigeki Sugano, “A Driver Situational Awareness Estimation System Based on Standard Glance Model for Unscheduled Takeover Situations,” *Proceedings of 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2019)*, pp. 718-723, June 9-12, 2019, Paris, France.
- [7] Ayako Torisaka, Kohei Ogawa, Satoshi Miura, Victor Parque, Tomoyuki Miyashita, Hiroshi Yamakawa, “Study on in-plane and out-of-plane deformation considering elastic plasticity of membrane,” *Proceedings of The American Institute of Aeronautics and Astronautics Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech Forum)*, 2019.
- [8] Tamon Miyake, Zhengxue Cheng, Satoshi Hosono, Shintaro Yamamoto, Satoshi Funabashi, Cheng Zhang and Emi Tamaki, "Heel-Contact Gait Phase Detection Based on Specific Poses with Muscle Deformation," *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 977-982, 2019.

3.2 学会および社会的活動

- [9] 松繁怜, 亀崎允啓, 小坂拓未, 岩田浩康, 菅野重樹, “主観評価を取り入れた基本入出力ゲイン調整に関する研究～使いやすさと作業効率性の関連性分析～”, 第 20 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論文集(SI2019), pp. 2568-2571, 2019 年 12 月 12～14 日, 高松, 香川.
- [10] 板野峻也, 亀崎允啓, 森島洋忠, 岩田浩康, 菅野重樹, “操作型作業機械の知能化に関する研究～第 13 報：重回帰分析を用いた操作支援～”, 第 20 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論文集(SI2019), pp. 2564-2567, 2019 年 12 月 12～14 日, 高松, 香川.
- [11] 岡直樹, 亀崎允啓, 河野陽大, 江馬敬明, マナワドゥ ウダーラ, 菅野重樹, “交通負荷情報と運転者の生体・行動・主観指標を用いた再帰型深層学習による運転負担推定に関する研究”, 第 20 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論文集(SI2019), pp. 2203-2206, 2019 年 12 月 12～14 日, 高松, 香川.
- [12] 上原悠嗣, 亀崎允啓, 東宏河, 片野貴裕, 金子大靖, 石田健蔵, 菅野重樹, “多自由度災害対応ロボットにおける人と自動化機能との協調に関する研究～人の動作目的入力に着目した操作権限の動的配分手法～”, 第 20 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論文集(SI2019), pp. 1629-1632, 2019 年 12 月 12～14 日, 高松, 香川.
- [13] 亀崎允啓, 林弘昭, ウダーラ マナワドゥ, 菅野重樹, “タクティカルレベル入力を用いた自動運転時の予定外権限移譲における制御介入手法の提案”, 第 17 回 ITS シンポジウム 2019, paper no. 2-A-05, 2019 年 12 月 12～13 日, 金沢, 石川.
- [14] 森大河, 亀崎允啓, 黄逸凡, ナワドゥウダーラ, 石原達也, 中野将尚, 越地弘順, 肥後直樹, 椿俊光, 菅野重樹, “操作特徴量のみを用いた機械学習に基づく電動車いす操作者の基本操作技能レベル判定手法の提案”, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2019 (LIFE2019), paper no. 030, 2019 年 9 月 12～14 日, 日吉, 神奈川.

- [15] 亀崎允啓, 小林彩乃, 河野遼介, 菅野重樹, “人・ロボット系における相互の譲り合いを考慮した主張・同調的軌道計画手法”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2019), paper no. 3N1-02, 2019 年 9 月 3~7 日, 早稲田, 東京.
- [16] 亀崎允啓, 金田太智*, 平山三千昭, 小林彩乃, 河野遼介, 菅野重樹, “反復的行動探索の効率化による複数移動障害物の回避軌道計画”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2019), paper no. 3N1-03, 2019 年 9 月 3~7 日, 早稲田, 東京.
- [17] Catherine Lollet, Hiroaki Hayashi, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano, “2D CNN Driver’s Gaze Direction Classification in Non-Aligned Head and Eyes Direction Situations”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2019), paper no. 1F3-02, 2019 年 9 月 3~7 日, 早稲田, 東京, 2019.
- [18] 亀崎允啓, 板野峻也, 森島洋忠, 岩田浩康, 菅野重樹, “操作型作業機械の知能化に関する研究～重回帰分析を用いた作業効率に係る要因解析～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 論文集(Robomech’ 19), paper no. 1P2-E10, 2019 年 6 月 5~8 日, 広島, 2019.
- [19] 亀崎允啓, 岡直樹, 石川雅晃, マナワドゥ ウダーラ, 河野陽大, 菅野重樹, “平面可動型力覚グリップと入出力状態提示モニタを用いた車両制御インタフェース”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 論文集(Robomech’ 19), paper no. 2A1-D07, 2019 年 6 月 5~8 日, 広島. (ポスター), 2019.
- [20] 亀崎允啓, 金田太智, 大西智也, 円谷優佑, 小林彩乃, 河野遼介, シュレスタ ムーンディプ, 菅野重樹, “リスク・ベネフィットの推定と調整に基づく接近・接触移動フレームワークに関する研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 論文集(Robomech’ 19), paper no. 2P1-K10, 2019 年 6 月 5~8 日, 広島. (ポスター).
- [21] 林弘昭, マナワドゥ ウダーラ, 河野陽大, 江馬敬明, 富田智哉, 亀崎允啓, 菅野重樹, “テイクオーバー時の認知的関与度の推定に関する研究～基準視線パターンの導出と視線誘導支援システムの評価～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 論文集(Robomech’ 19), paper no. 2A1-D06, 2019 年 6 月 5~8 日, 広島. (ポスター).
- [22] 三宅 太文, 小林 洋, 藤江 正克, 菅野 重樹, “ワイヤ駆動型歩行訓練ロボットによる断続的な介入による訓練効果の検証”, 第 37 回日本ロボット学会学術講演会(RSJ), 3C3-03, 早稲田大学, 東京, 9 月 4-7 日, 2019.

4. 研究活動の課題と展望

研究により, 歩行時の関節角度からつま先離床タイミングを検出し, その周期の最小つま先高さを予測する手法を実現した. 6 名の被験者に対し, 二乗平均平方根誤差 2.34 mm と既存手法よりも高精度に最小つま先高さを予測することができた. また, 最小つま先高さの全周期の中央値よりも低い値を検出する確率は 68% よりも高く, ランダム検出の確率よりも高く下位の最小つま先高さの検出が可能であることを示した. 今後は, アルゴリズムの更なる精度向上を目指しつつ, 予測結果に基づき実際につまずきを予防することが可能なシステムの構築を目指す.