

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18463

研究課題名（和文）バイオメカニクス×機械学習×映像解析による歩行分析・転倒リスク評価システムの開発

研究課題名（英文）Gait analysis and fall risk assessment: Multidisciplinary integration of biomechanics, signal and image processing, and machine learning

研究代表者

藤本 雅大 (Fujimoto, Masahiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：10732919

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：歩行運動の遠隔計測により「転倒リスクの定量的評価」と「転倒リスクに関連する歩行特徴の抽出」を可能にする技術の確立を目的として研究を実施し、以下の成果を挙げた。（1）マイクロ波ドップラーレーダにより取得した歩行運動のデータから、機能レベル（年代、転倒経験の有無など）の異なる個人の歩容を高精度で判別・分類することに成功した。（2）カメラにより取得した歩行の動画データから、歩行の運動学データと転倒リスク関連指標を算出するアルゴリズムを構築し、その有用性を実証した。遠隔計測した歩行運動のデータから、対象者の年代と転倒リスク、転倒リスクに関連する歩行特徴を推定できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ波ドップラーレーダとカメラを用いた歩行の遠隔計測により、年代や転倒リスクの異なる個人の歩容を判別・分類することと、歩行特徴および転倒リスク関連指標を推定することに成功した。特に、本研究で芽吹いたドップラーレーダを用いた歩容判別・分類技術は、社会での広範な利活用を可能にする潜在性を秘めている。マイクロ波を用いた計測では、日常での利活用を妨げる要因となるデータ量、プライバシー、衣服や照明条件の影響などがほとんど問題にならないためである。機器の着用を必要とせず、対象者にも触れることなく、服装や照明条件の変化にも頑健な形で歩行分析と転倒リスクの評価を可能にする発展性を秘めた萌芽技術である。

研究成果の概要（英文）：Most falls resulting in fatal physical injuries in older adults occur while walking. Early detection of age- and fall-risk related changes in gait characteristics would allow effective intervention for fall prevention. The aims of this study were twofold: (i) radar-based gait classification for fall risk assessment, and (ii) video-based gait assessment to estimate fall-risk related stability metrics. Spectrogram images obtained from a micro-Doppler radar allowed us to classify gait patterns of the individuals of different age and fall-risk groups with high accuracy. Gait parameters and stability metrics calculated from the 2D body pose estimates from videos were comparable to those derived from the optical motion capture. These results demonstrate that both radar and camera have the potential to be a low-cost, easy-to-use alternative to traditional laboratory-based optical motion capture for gait analysis and fall risk assessment, suitable to monitor one's motion in natural settings.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：歩行分析 バイオメカニクス 機械学習 映像解析 転倒予防

1. 研究開始当初の背景

日常生活の中で生じる転倒とそれに伴う深刻な外傷は、要介護状態を招く主たる要因の一つであり(Rubenstein and Josephson, 2002), 転倒予防は今の超高齢社会における健康寿命延伸のための喫緊の課題である。転倒は歩行中に頻繁に生じ (Li et al., 2006), 歩幅の減少を伴う歩行速度の低下や, つま先位置の低下などが転倒リスクに関連していること(Studenski et al., 2011; Winter et al., 1990)などから, 日常的な歩行の分析と歩容の改善が, 転倒ハイリスク者の早期発見と転倒予防に有効であると考えられる。しかしながら, 現在の歩行分析は大掛かりで高価な設備や機器の着用を必要とする方法がその主流であり, 日常利用に適さない。個人の日常生活に自然と介入するには, 機器の着用を必要とせず, 対象者にも触れることなく個人の歩行を計測・評価できることが望ましい。

これに対し, 近年の機械学習や映像解析技術の進展に伴い, 対象者に非接触・無拘束な形で取得できる動画像から歩行者の認識 (Hazem El-Alfy et al, 2017), 転倒シーンの検出 (小林ら, 2014), 姿勢推定 (Kinect や OpenPose など) などを実現する技術が実用化されてきている。しかしながら, 転倒ハイリスク者の早期発見と転倒予防に有効と考えられる「転倒リスクの見える化」と「転倒予防のための歩容改善」を可能にする技術は確立されていない。その技術の確立には, 従来の機械学習や映像解析手法に加えて, 身体運動のバイオメカニクスに根差した「転倒リスクの定量的評価」と, 「転倒リスクに関連する歩行特徴の抽出」が必要となる。そこで本研究では, 機械学習と映像解析にバイオメカニクスの知見を融合させた歩行分析により, 対象者に非接触・無拘束な形で転倒リスクの評価と歩容改善フィードバックを可能にするシステムの技術基盤の構築を目指して研究を実施した。

2. 研究の目的

遠隔計測により取得した歩行運動のデータから, (1) 対象者の機能レベル (年代や転倒リスク) を推定する歩容判別・分類技術の確立と, (2) 転倒リスクの定量評価と転倒リスクに関連する歩行特徴を抽出する技術の確立を目的とした。

3. 研究の方法

上記 (1), (2) の目的を達成するために, 以下の2点を主軸として研究を進めた。

(1) 対象者の機能レベル (年代や転倒リスク) を推定する歩容判別・分類技術の確立

年代および転倒経験の異なる個人の歩行運動のデータを機械学習により分類し, その精度を検証した。歩行運動の計測には, 対象への送信信号と対象からの反射信号とを利用することで対象の速度を計測することができるマイクロ波ドップラーレーダを用いた (図1)。機器の装着を必要とせず対象者の運動の遠隔計測が可能で, マイクロ波は服装や照明条件の影響をほとんど受けないことから頑健な歩容認証が見込めるためである。

若年者, 中年者, 高齢者 (転倒非経験者および経験者) を対象として, ドップラーレーダからの送信信号に対する身体からの反射信号を処理することで, 歩行中の身体各部位の速度の時間変化を表す画像情報 (ドップラーレーダ画像) に変換した (図2)。ドップラーレーダ画像あるいは画像から抽出した歩行速度パラメータを学習データとし, 計測対象者各群のデータに共通する/差異を示す特徴量を機械学習により抽出することで, 対象者の機能レベル (年代, 転倒経験の有無) を分類し, その精度を検証した。



図1 ドップラーレーダを使用した計測の例

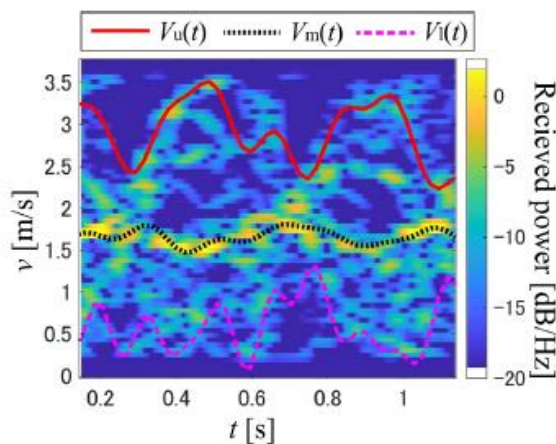


図2 ドップラーレーダ画像の例 (文献①より引用)

(2) 転倒リスクの定量評価と転倒リスクに関連する歩行特徴を抽出する技術の確立

機能レベルの異なる個人の歩行運動のデータから、映像解析により歩行特徴および転倒リスク関連指標を推定し、その精度を検証した。歩行運動のデータには、カメラにより取得した動画データを用いた (図3)。

若年者と高齢者 (転倒非経験者および経験者) の歩行運動を、対象者の側方に設置したカメラと、光学式モーションキャプチャシステムにより同時に計測し、得られた身体座標データから歩幅やケイデンス、身体重心速度などの歩行の運動学的変数および転倒リスク関連指標を算出し比較することでその精度を検証した。動画データからの身体関節座標の推定には、深層学習を用いて身体の特徴点を抽出する姿勢推定ライブラリ OpenPose を使用した。抽出した身体座標データから身体重心の位置と速度とを推定し (図4)、歩行中の身体重心の安定性指標を算出することで転倒リスクを評価した。

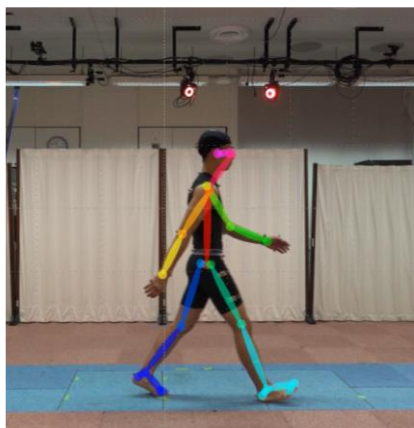


図3 歩行の動画データと関節座標の推定の例

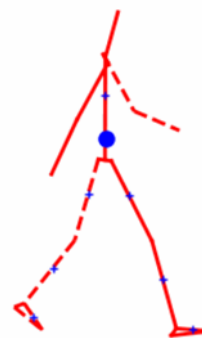


図4 推定された関節座標からの身体重心の推定の例

4. 研究成果

上記 (1), (2) の研究に対応して、それぞれ以下の成果を挙げた。

(1) 対象者の機能レベル (年代や転倒リスク) を推定する歩容判別・分類技術の確立

遠隔計測が可能なドップラーレーダにより取得した歩行運動を画像化したデータ (ドップラーレーダ画像) から、計測対象者の年齢 (若年, 中年, 高齢など) と転倒リスク (転倒ハイリスク, ローリスクなど) を推定する推論モデルを構築し、その有用性を実証した。具体的には、若年者において 90%以上の精度で個人を認証できること、若年者と高齢者の歩容を 90%近い精度で判別できること (図5)、そして中年者と高齢者の歩容および転倒経験者と非経験者の歩容を 80%近い精度で判別できること (図6) を実証した。また、学習データにはドップラーレーダ画像をそのまま用いるよりも、歩行速度パラメータを抽出して用いた方が分類精度は向上することも明らかとなった (図6)。ドップラーレーダ画像により得られた歩行速度パラメータを利用することで、対象者の年代と転倒リスクを推定できる可能性を示した。

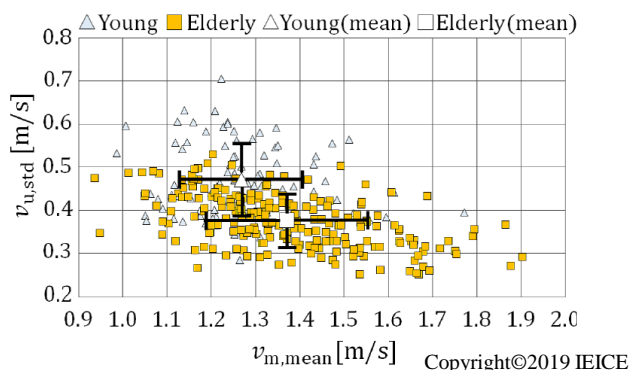


図5 若年者と高齢者の歩容分類の例 (文献②より引用)

	Deep learning	Gait parameters
Faller classification	73.2 ± 3.4%	78.9 ± 2.7 %
50s/70s classification	75.2 ± 3.4%	81.6 ± 1.9 %

図6 50/70代, 転倒経験者/非経験者分類の結果

(2) 転倒リスクの定量評価と転倒リスクに関連する歩行特徴を抽出する技術の確立

カメラにより取得した歩行の動画データから、歩行の運動学データと転倒リスク関連指標を算出するアルゴリズムを構築し、その有用性を実証した。具体的には、構築したアルゴリズムにより、歩行の動画データから歩行周期を決定づける歩行イベント（踵接地やつま先離地の瞬間）を精度よく検出できること（図7）と、転倒リスクに関連する歩幅や身体重心速度、身体重心の安定性指標なども大きな誤差なく推定できること（図8左）を実証した。若年者、転倒非経験者（転倒ローリスク者）、転倒経験者（転倒ハイリスク者）の歩行において、歩行中の身体重心の安定性を示す指標を比較した結果、踵接地の瞬間においてその値に若年者と転倒非経験者との間で大きな差異はない一方で、転倒経験者では高い傾向が見られた（図8右）。先行研究と一致する形で、転倒経験者は非経験者に比べてより安定性を重視した歩行戦略をとることを示唆する結果となった。歩行の動画データから転倒リスクに関連する歩行特徴が抽出できる可能性を示した。

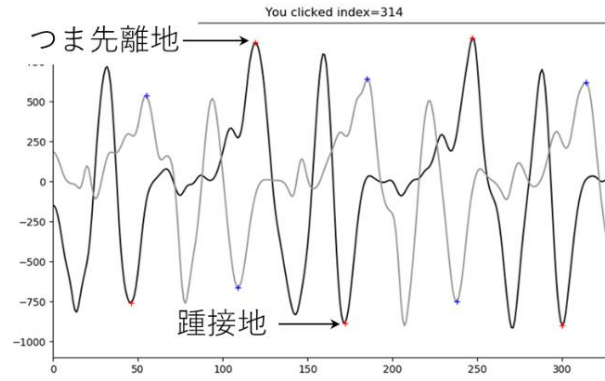


図7 歩行イベント（踵接地やつま先離地の瞬間）の検出の例

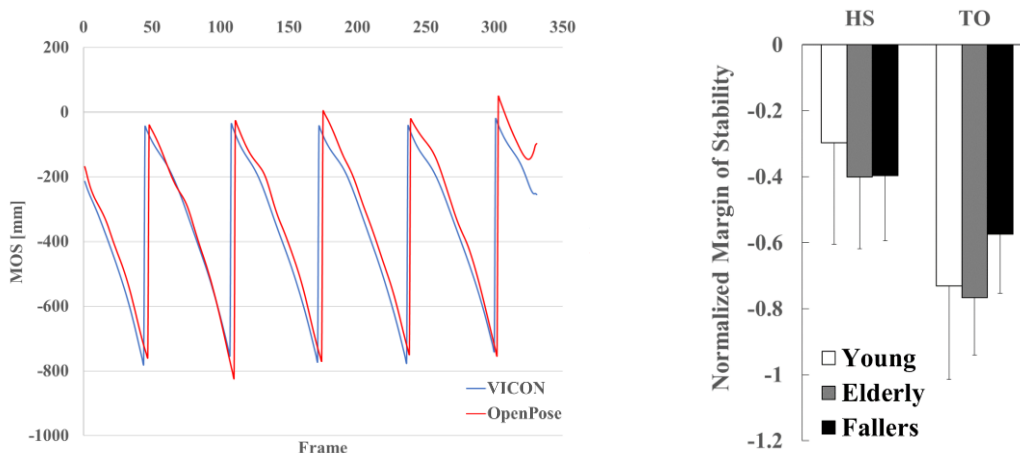


図8 若年者、高齢転倒非経験者と転倒経験者の重心の安定性

(左) モーションキャプチャ (VICON) との比較の例 (右) 踵接地 (HS) とつま先離地 (TO) の瞬間の値

(3) 研究成果のまとめと今後の展望

ドップラーレーダとカメラを用いた歩行の遠隔計測により、以下の2点を達成した。

- ① 歩行運動のドップラーレーダ画像から、機能レベル（年代、転倒経験の有無など）の異なる個人の歩容を高精度で判別・分類することに成功した。
- ② 歩行の動画データから、歩行の運動学データと転倒リスク関連指標を算出するアルゴリズムを構築し、その有用性を実証した。

また、機械学習による歩容分類の際には、学習データにドップラーレーダ画像をそのまま利用するよりも、転倒リスクに関連する歩行速度パラメータを抽出して利用した方がその精度は向上した。機械学習を活用した探索的なアプローチであっても、身体の運動メカニズムに根差して適切に運動パラメータを選定することで精度の向上が見込めることを示唆しており、バイオメカニクス×機械学習×映像解析による学際的な研究体制により得られた研究成果と言える。

なお、研究開始当初においては、歩行の動画データを主として用いることを計画していた。しかしながら、動画ベースの歩行分析では、(1)データ量、(2)プライバシー、(3)衣服や照明条件の影響が、日常計測および社会での利活用を妨げる要因となり得る。本研究により芽吹いたドップラーレーダを用いた遠隔計測による歩容判別・分類技術は、これら(1)～(3)の問題を一挙に解決する技術であり、日常での広範な利活用を可能にする潜在性を秘めている。現状では歩容判別・分類に留まっているが、予備的研究では歩幅などの歩行特徴の推定も可能であることを確認している。今後も学際的な連携を続けることで本技術を更に発展させ、より詳細な歩行分析まで可能にすることで、転倒リスクに代表される健康リスクの日常評価を実現する新技術の確立を目指す。

<引用文献>

- ① Saho K, Shioiri K, Fujimoto M, Kobayashi Y. Micro-Doppler Radar Gait Measurement to Detect Age-and Fall Risk-Related Differences in Gait: A Simulation Study on Comparison of Deep Learning and Gait Parameter-Based Approaches. IEEE Access, vol.9, 2021, pp.18518-18526.
- ② 沖中宏彰, 佐保賢志, 藤本雅大, 吳政賢, 菅野功貴, 馬杉正男, 上村一貴, 松本三千人. マイクロドップラーレーダを用いた若年者と高齢者の歩容判別. 電子情報通信学会論文誌 A, vol. J102-A, no. 5, 2019, pp. 167-170.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saho Kenshi, Shioiri Keitaro, Fujimoto Masahiro, Kobayashi Yoshiyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Micro-Doppler Radar Gait Measurement to Detect Age- and Fall Risk-Related Differences in Gait: A Simulation Study on Comparison of Deep Learning and Gait Parameter-Based Approaches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 18518 ~ 18526
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3053298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shioiri Keitaro, Saho Kenshi, Fujimoto Masahiro, Kobayashi Yoshiyuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Radar-based Gait Classification of Elderly Non-Fallers and Multiple Fallers Using Machine Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech)	6. 最初と最後の頁 399-400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LifeTech52111.2021.9391835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 肥田直人, 藤本雅大, 小林吉之	4. 巻 34
2. 論文標題 最大速度での歩行時における重心の動的安定性の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 沖中宏彰, 佐保賢志, 藤本雅大, 呉政賢, 菅野功貴, 馬杉正男, 上村一貴, 松本三千人	4. 巻 J102-A
2. 論文標題 マイクロドップラーレーダを用いた若年者と高齢者の歩容判別	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 167-170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saho K, Uemura K, Fujimoto M, Matsumoto M	4. 巻 8
2. 論文標題 Evaluation of Higher-Level Instrumental Activities of Daily Living via Micro-Doppler Radar Sensing of Sit-to-Stand-to-Sit Movement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JTEHM.2020.2964209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kudo S, Fujimoto M, Sato T, Nagano A	4. 巻 77
2. 論文標題 Determination of the optimal number of linked rigid-bodies of the trunk during walking and running based on Akaike 's information criterion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Gait and Posture	6. 最初と最後の頁 264-268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2020.02.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kudo S, Fujimoto M, Isaka T, and Nagano A	4. 巻 63
2. 論文標題 Quantitative evaluation of linked rigid-body representation of the trunk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Gait and Posture	6. 最初と最後の頁 119-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2018.04.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 肥田直人, 藤本雅大, 小林吉之
2. 発表標題 最大速度での歩行時における重心の動的安定性の分析
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI ' 20)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐保賢志, 上村一貴, 孟林, 藤本雅大, 松本三千人
2. 発表標題 ドップラーレーダを用いた無拘束な日常動作計測に基づく健康リスクを有する高齢者のスクリーニング技術
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐保賢志, 藤本雅大, Li-Shan Chou
2. 発表標題 ドップラーレーダを用いた起立動作解析技術の検討
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 肥田直人, 藤本雅大, 小林吉之
2. 発表標題 性別および年齢が歩行中の重心の動的安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩入慶太郎, 佐保賢志, 藤本雅大, 小林吉之
2. 発表標題 ドップラースペクトログラム画像の深層学習を用いた歩容判別
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shioiri Keitaro, Saho Kenshi, Fujimoto Masahiro, Kobayashi Yoshiyuki
2. 発表標題 Radar-based Gait Classification of Elderly Non-Fallers and Multiple Fallers Using Machine Learning
3. 学会等名 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kudo S, Fujimoto M, Sato T, and Nagano A
2. 発表標題 Kinetic Characteristics of the Trunk during Walking
3. 学会等名 The 25th Congress of the European Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saho K, Uemura K, Fujimoto M, and Matsumoto M
2. 発表標題 Micro-Doppler Radar Measurement of Sit-to-Stand-to-Sit Movement toward Unconstrained Evaluation of High-level Instrumental Activities of Daily Living
3. 学会等名 The 10th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖中宏彰, 呉政賢, 佐保賢志, 菅野功貴, 藤本雅大, 馬杉正男, 上村一貴, 松本三千人
2. 発表標題 マイクロドップラーレーダを用いた若年者と高齢者の歩容判別
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'18)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kudo S, Fujimoto M, Sato T, and Nagano A.
2. 発表標題 Kinetic contribution of multi-segmental trunk during dynamic movements
3. 学会等名 The 8th World Congress of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下寛賢人, 藤本雅大, 本城豊之, 寺田昌史, 伊坂忠夫
2. 発表標題 通常歩行に規則的な大股歩を加える新しい歩行様式の下肢キネティクス解析
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 工藤将馬, 藤本雅大, 佐藤隆彦, 長野明紀
2. 発表標題 赤池情報量基準に基づいた体幹部の動作解析に適した剛体セグメントモデルの検討
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茅野宏紀, 下寛賢人, 大井翔, 藤本雅大, 松村耕平, 野間春生, 伊坂忠夫
2. 発表標題 加速度を用いた歩行様式 i-Walk の促進システムの開発
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kudo S, Fujimoto M, Sato T, and Nagano A
2. 発表標題 Determination of the optimal number of rigid-body segments to represent the trunk using Akaike's information criterion
3. 学会等名 The 36th International Conference on Biomechanics in Sports 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Okinaka H, Saho K, Fujimoto M, Go S, Masugi M, Sugano K, Uemura K, and Matsumoto M
2. 発表標題 Gait Classification of Healthy Young and Elderly Adults Using Micro-Doppler Radar Remote Sensing
3. 学会等名 SCIS&ISIS2018 in conjunction with ISWS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長野 明紀 (Nagano Akinori) (30392054)	立命館大学・スポーツ健康科学部・教授 (34315)	
研究分担者	小林 吉之 (Kobayashi Yoshiyuki) (00409682)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長 (82626)	
研究分担者	佐保 賢志 (Saho Kenshi) (00732900)	富山県立大学・工学部・講師 (23201)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	周 立善 (Chou Li-Shan)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Oregon	Iowa State University		
米国	University of Oregon	Iowa State University		
米国	University of Oregon			