

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：33501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11924

研究課題名(和文) デジタル汎用機器を用いた日常生活時の下肢生体情報測定法の開発

研究課題名(英文) Development of lower extremity biological information measurement method in daily life using digital general-purpose equipment

研究代表者

内田 恭敬 (Uchida, Yasutaka)

帝京科学大学・生命環境学部・教授

研究者番号：80134823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：下肢生体情報取得のためのシステム開発を行い、2次元に配列した圧力センサアレイを用いた歩行分析を行った。一部の実験では測定時に市販のインソール圧力センサや加速度計を併用して歩行時の圧力分布変化との対比も行った。2Dセンサー上を人工透析治療を受けている方に、透析前後で歩行していたとき、考案したふらつき係数と歩行速度とを特徴量として機械学習を行わせることで被験者の症例に対応する結果が得られた。また、スマートインソール及び加速度センサーからのセンサー位置の重要性を検討するとともに圧力センサアレイの結果を対比・分析して圧力センサシステムの有用性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マット型のセンサアレイを用いることで日常生活で靴を履く習慣がない日本人の生活スタイルにも適用でき、かつ画像を使用しないことでプライバシーの問題がない方法を提案した。人工透析を行っている患者の方へこの手法を適用し、考案したふらつき度合いを示す指数を特徴量としたデータで機械学習を行い、被験者の体調のグループ分けができることを示した。歩行中の状態を従来の高価で設置場所が限定されるシステムに代わるフリーでスマホでの利用が可能とされる骨格認証ソフトを用いて、疑似的な運動制限時の足首や膝の状態が分析でき、容易に施設等の医療現場にフィードバックできる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We developed a system for acquiring lower limb biometric information and performed gait analysis using a two-dimensional array of pressure sensor arrays. In some experiments, commercially available insole pressure sensors and accelerometers were used in conjunction with the system to compare the results with changes in pressure distribution during walking. The results corresponded to the subject's case. In addition, the importance of the sensor position from the smart insole and the accelerometer was examined, and the usefulness of the pressure sensor system was found by contrasting and analyzing the results from the pressure sensor array.

研究分野：医用電子工学

キーワード：2次元圧力センサアレイ インソールセンサー 機械学習 k-mean法 ふらつき 歩行分析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、活動中の生体情報を測定する技術が急速に発展し、医療やスポーツの領域で盛んに研究されていた。また、移動を測定する装置は介護の見守り機器として開発されていた。しかし、それらは測定のためにウェアブル機器のスイッチを入れる、装着する、特定の道具を使う等、意図的な測定、スイッチの on/off が必要な装置であり、日常生活中ほぼ全ての活動を自然にモニタリングするものではなかった。そして、近代の日本では生活様式が和式から洋式に変わり下肢へのケアが必要となっており、我々は福祉機器開発にあたり生活様式が生体情報へ与える影響を研究する中で、下肢機能の維持向上の重要性を見出しヨーロッパのフットケア技術を調査した。しかし、生活様式の変化に注目した生体情報測定の研究は行われていなかった。活動中、常に外界と密着しているのは足底、足裏である。我々はこの足裏からの生体情報測定に着目した。

2. 研究の目的

急速な生活様式及び家族形態の変化に対する不安に対して、① 光・音波・圧力センサー及び市販ウェアラブル機器から取得したデータに機械学習を利用した生体情報解析方法を適用し、② 高齢者及び身体機能障害者の日常生活における長時間の生体情報・活動状況変化を捉え、作業療法士による生活活動能力判定と照らし合わせ、生活改善に繋げることを目的とした下肢生体情報測定法の提案を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 足裏調音測定

人工透析を行う前後で電子聴診器を用いて足裏の血流による音を測定した。測定信号はBluetoothより PC へ直接送信され wav ファイルとして保存を行った。また、画面上ではスペクトログラムとして表示されるのでこれも保存して、血流変化の特徴を検討した。

3.2 2D センサーマットの測定

ベッドからの起き上がりとそれに続く歩行の分析に用いた圧力変化により抵抗値が変化するセンサーシステムに改良を加えた。

今回改良した検出システムは図1に示すように従来の進行方向に対して垂直となるようなセンサーの配置に、左右の足に対応するように進行方向に平行にかつ各足に対して2組センサーを追加した点である。例えば図中で Q0 と Q1 と名付けているように左足の内側と外側のどちら側にも体重

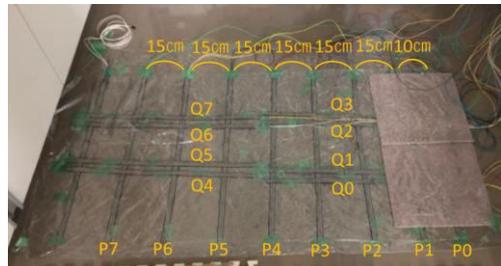


図1. 2D センサーマット

が加わっているのか検出するために配置している。

足の内側と外側が検出できるように 1.5 cm の間隔で配置した。センサーの長さが 62 cm と短いため、2 つのセットを直列に配置して約 120 cm の長さを測定できるようにしている。左足と右足の間は、被験者の体格を検討して高齢者の方が測定できるように約 15 cm と仮定して設置した。進行方向に垂直に配置したセンサーはスタート地点を明らかにするため最初の P0 と次の P1 の間隔のみ 20 cm とし、それ以降の間隔は 15 cm とした。センサーの位置が明らかとなるようにビニールシート上にテープで固定し、さらにもう一枚のビニールシートで表面を保護する形とした。

圧力センサーは圧力により抵抗が変わるタイプのものを使用しており 100 Ω から 1 M Ω 以上の範囲まで変化する。このセンサーに 1 k Ω の抵抗を直列に接続して、その抵抗の電圧変化を入力信号としている。各センサーは 1 kHz で電圧を測定しており 16 個のセンサーからの信号を 1 組として使用している。PC には Processing3 により作成したプログラムを用いて、Arduino Mega2560 R3 と接続し、通信や書き込み時間を考慮してほぼ 1 秒間に 50 組のデータを取得している。各圧力センサーの出力信号は PC にテキストデータとして取り込んだのちにエクセルや Python で処理している。

被験者は血液透析の治療を受けている患者の方の場合には透析前後で、健常者ではサポーターや高齢者体験キットにより疑似的な運動制限を行い、測定を行った。歩行方向と垂直に並べたセンサーからは、センサー間隔の情報をもとに歩行速度を求めた。

3.3 インソールセンサー及び加速度センサーを用いた測定

2D センサーマットに関連する歩行評価の有用性を確認するため、e ラバースマートインソール

ル FEELSOLE®及び加速度センサーを用いて、センサーから得られる CSV 信号のピークや減衰の特徴などを分析することとした。具体的には体幹、上肢、下肢への体重負荷による視覚・運動制限をシミュレーションし、リハビリテーション評価で用いられるタイムアップ&ゴーテストと比較した。

使用した e ラバースマートインソール FEELSOLE®は S、M 及び L の 3 サイズで 2cm 刻みの幅であった。その際につま先部分の出力が低く感じられることがみられ、センサー位置を正確に把握する必要が重要ではないかという疑問が生じた。ランニングやゴルフをはじめとするスポーツでのスマートインソール使用とリハビリテーションでの使用では、着眼点が異なる可能性もある。特に、足の指の先端は 1 つ 1 つの骨が短いため、少しのセンサー設置位置の差が出力に影響する可能性がある。そこで、センサー位置を任意に変更できるようにするため圧力センサーを靴の中敷きにテープで固定した装置を作製して、つま先のセンサー位置を変化させ歩行時の圧力変化を調べることにした。自作した装置は 4 つの直径 13mm の円形の市販の抵抗変化型圧力センサーを靴の中敷きにつま先、内側、外側及び踵部分にテープで固定しているので容易に位置を変更できる。圧力変化に対応する電子信号を arduino nano にBluetooth機能を持たせた自作のインソールセンサーを作製した。各部の信号波形を CSV データとして保存して、つま先のセンサー位置の違いを中心に波形解析を行った。

3.4 メディアパイプを用いた分析

画像を用いた動画解析は、リハビリや共同研究などの医療・ヘルスケア分野で古くから利用されてきた。研究は行われているが、画像解析が患者さんの日常のリハビリ支援に活用されているとは言えない状況である。映像解析をリハビリに低コストで活用する方法を示すことができれば、多くの人が利用できるようになる。さらに今回測定に用いた 2D センサーマットの解析制度を向上できる可能性がある。

MediaPipe は Google の無料ソフトウェアである。全身に対応した顔データやポーズに特化したソフトウェアで、関節等の座標に関する数値データを取得できる。2次元(2D)検出から3次元(3D)スケルトンを画面に表示することも可能である。体格に投影された骨格の画像を見る機能は、リハビリテーション施設でも簡単に実装が可能である。これらの考えに従い、画像から膝や足首の角度を計算した。足首角度の長期データは、病気などによる体調変化の早期発見にも役立つかを検討した。このソフトウェアを採用し、これまで考えられていなかった歩行補助機器であるオーソボットを用いた歩行変化の基礎解析を行い、リハビリテーションの分野でどの程度応用できるかも検討した。

4. 研究成果

4.1 足裏調音測定

光学式センサーや聴音用マイクをインソール、靴下、足台またはフロアマットに組み込み、測定データを無線通信により取り出せるよう、市販のウェアラブル健康管理装置開発キットを用いて測定を試みた。歩行前状態では安定した測定ができたが、実際の歩行状態における調査では密着状態が安定しなかったことや歩行時の振動により高い信頼性には至らなかった。

さらにアタッチメントと測定部位を検討して病院で透析患者の聴音測定を行ったところ、透析患者の場合に血流が弱いこと、透析時に透析室内で生じる医療スタッフ会話や装置からの音等の影響で、拍動に関係する音を機械的に区別するのが難しいことが判明した。

DFT によるスペクトル分析データに機械学習を適用することでノイズの影響を避ける必要が明らかとなり基礎データの集積の準備を進めることを検討した。電子聴診器がモノラルであったため分離が難しくステレオ化やノイズキャンセリングのシステム面での課題が明確になったが、新型コロナ禍のため病院での測定が不可能となった。

歩行前状態では安定した測定が可能であったが、歩行時の調査において密着状態と振動の問題が生じたため、歩行時の足底状態や振動を調査することとした。スマートインソールでの足底部位による違い、フロアマットを用いた透析患者の歩行調査、骨格認証を用いた下肢関節の動き及び振子運動調査を行った。

4.2 2D センサーマットによる測定結果

位置とバランスを対応させた測定結果を図 2 に示す。進行方向に対して出力信号はほぼ一定の間隔で移動しているのがわかる。これに対して下部のバランスを示す Q の信号は一部しか観測されておらず、進行方向に対して左方向にずれて進んでいるのがわかる。これは当日の測定者の記録からもセンサーがうまく踏めていないことが確認されている。人工透析前後で歩行速度が被験者により大きく異なることを見出された。歩行速度を新たな特徴量として用いることが有効であると考えられる。左右バランスに関してはセンサーの反応時間やセンサーを踏んでいる時間と出力電圧との積では有効な分類ができず、別の指標を考える必要があると結論した。

この結果をもとに、左足 (L) での歩数 nL と右足 (R) での歩数 nR をカウントした。そして、バランス指数を次のように定義した。

$$|\Delta n|/n = |nL - nR| / (nL + nR), \quad (1)$$

歩行速度とバランス指数の関係を基にサポートベクターマシンで分析するとほぼ 2 つの領域に分類することができた。しかし歩行速度が大きな値を示したデータが離れた状態で存在しており十分な分類とは言えず、この点に関してさらなる分析が必要と考えられた。その原因として測定者が判断した分類に問題があるのではないかと考え、教師用データを与えない K-Mean 法を適用することを考えた。結果を図 3 に示す。

今回の測定に用いたフレキシブル圧力センサーは歩行時の足裏の接地圧力と左右それぞれの内側と外側の接地圧力バランスを測定した結果を解析することで体調変化の重症度が客観的に評価可能となる。本研究では被験者個々の症例を検討して高齢者 (D) や視覚障害 (B, C)、除水過多 (C, F) の被験者を選定して本システムの臨床応用の可能性を検討した。透析後のふらつきに関する指標として透析前後の下肢血流量測定を行い、透析中の除水、血圧低下に対する影響を圧力センサーの分析結果との関係性をした。圧力センサーの結果からすべての被験者において透析直後は歩行速度の低下や歩行バランスが低下していることが示された。

また、すべての被験者から下肢血流量の低下が認められたことで下肢血流量の減少とふらつきの関係性はある程度示せた。以上より本システムで得られた分析データが患者背景、透析条件をもとに体調変化を事前に察知し、症例に応じたケアを医療スタッフ、家族にフィードバックできる可能性が示唆された。

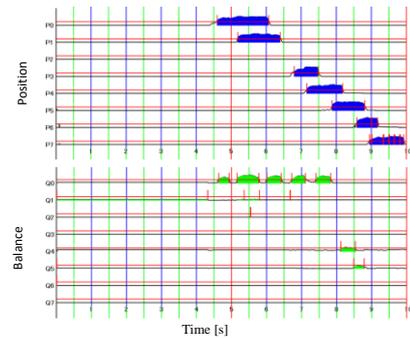


図 2. 位置とバランスを対応

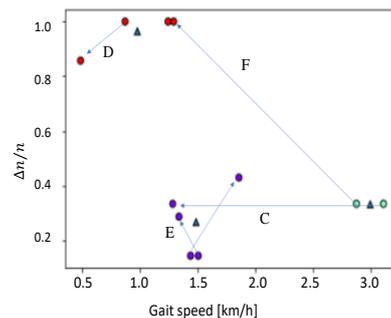


図 3. K-Mean 法による分析

4.3 インソールセンサー及び加速度センサーを用いた測定

スマートインソールの測定では関節の動きを制限した測定を行った。つま先、踵、内側、外側の 4 つの部分から出力をグラフ化して、サポートベクターマシン、K 近傍法を用いた機械学習による分類を行った。足首関節の制限の有無の結果では分析精度が向上することを確認し、歩行中の各部分の波形ピーク値、各ピーク後の値の減少率を用いることで体調の変化を把握しやすくなる可能性も見出した。これらの知見をもとに 2D センサーマットからのデータとスマートインソールから得られるデータに関して疑似的な運動制限を加えた場合について分析を行い 2D センサーマットと圧力センサー付きスマートインソールの相関が高いことがわかった。

これまでの最小二乗法による歩行速度の算出に加え、足跡を用いた手計算を行ったところ、より高い TUG との関係が示された。直接計算の結果、同一足底接地か否かの判断に関して、新たな速度の算出条件を立案することで、ワンフットプリントかツーフットプリントか、つまり同じ足底接地かどうかの判断が重要であり、値や反応の小さいデータを計算に用いるべきか、除外してノイズとして扱うべきかの判断ができるようになった。今回は連続した 10 個のデータを使用した。センサー間の距離や歩行速度によってこの数は変化する可能性がある。運動障害を模擬した測定であるが、高齢者や障害者の中には、歩行速度が遅い人もいる。仮に P センサーの出力がないとすると、前後の P センサーのデータは異なる足底接地と判断できるため、センサー間隔を狭めることが有効である。最小二乗法プログラミング解析 (LSM) で速度が速くなったと判断したのは、2 つのセンサーの同じ足底接地点を異なる足底接地点として同じデータとして扱ったためと思われる。LSM 計算による速度は TUG との相関は低い。直接手計算 DC で算出した速度とほぼ同じであった。本研究は少数のデータによるものであるため、今後、日常生活計測で大量のデータを用いて解析した場合には、より高い相関が得られる可能性がある。以上の結果から、足底の接地が単一か異なるかを区別することが重要であることがわかった。加速度センサー付きインソールセンサーと 2D センサーマットとの比較も行った。歩幅に対する相関は高く 2D センサーマットの有用性が示せた。

また、装置の長さを約 120cm としたのは、歩行速度を求めるには小さい。しかし、家庭内に常時設置できる機器の大きさを考えると、これより大きいものは実用的ではないと考えられる。120cm の装置でも、左右の足の差は検出できる。Q の幅を狭くして、左右の足裏が接地しているかどうかを自動的に判断できるようにすれば、左右の足裏が接地する速度を算出し、左右の歩行能力の変化を検出することができる。

自作のセンサーによる解析では、センサー位置をインソールの先から 15mm の位置に設置して、運動制限を行わない場合と行った場合の歩行時の測定結果を図 4 (a) 及び (b) に示す。ピークと異なる位置が周期ごとに異なり、また出力電圧が小さくなっている部分が周期的に観測された。運動制限を行わない場合には信号が時間とともに減少した。

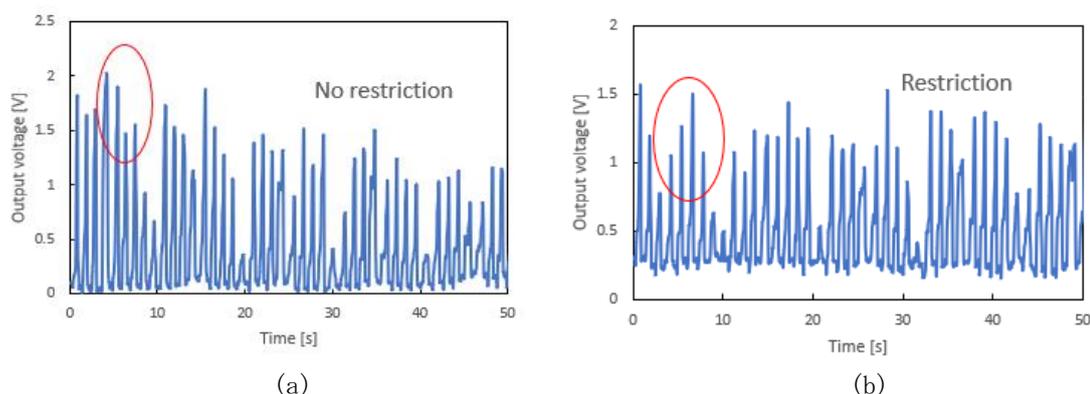


図 4. 運動制限を行わない場合と行った場合の歩行時の測定結果

ピーク値の 50%以下の低出力状態を U ターン時の状態と仮定し、最初の U ターンであろう低出力値の前までを一区切りとして、その区切りの中の連続する 4 つの値の中のピーク（最大値）と最小値の差を比較した。制限有の方が、差が大きい傾向であった。図 5 につま先からのセンサー位置を 15mm から 70mm まで変化させたときの出力電圧 4 点の平均と最大値と最小値の差（振幅）を示す。出力電圧はセンサーの位置が 35mm までは運動制限を行った場合に大きな値であったが 45mm を超えると運動制限を行わない場合が少し大きな値となった。

運動制限を行わない場合にセンサー位置が 35mm までの出力が大きかったのは歩行時に足の蹴りの影響と運動制限がある場合に着地時に右足が均一に着地しているフットフラットのため出力が小さくなったことが考えられる。被検者の指の付け根から先までが 40mm であった。45mm 以上では内側センサーすなわち踵に近い位置になるので出力が運動制限によらずほぼ同じとなったと考えられる。指の付け根付近を境目につま先側ではセンサー位置によりデータが大きく変わり、体の中心に近づくデータがあまり変わらないという結果を裏付けられる。

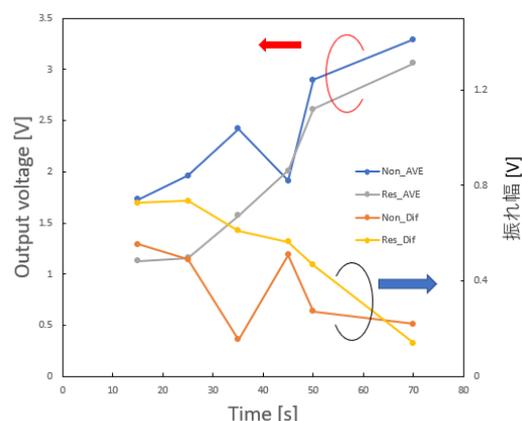


図 5. センサー位置を変えたときの出力

4.4 メディアパイプを用いた分析

倒立振りモデルの歩行を考慮し、図 6 のように補助具を装着した場合の効果はどのように現れ、効果が持続するかを、補助具の中心に垂直な方向からの首の角度の変化を調べることで最初の実験を行った。膝に疑似的な運動制限を加えた状態での歩行、歩行補助具を装着した状態での歩行そして歩行補助具を外して 5 分後の歩行状態を撮影した動画を、MediaPipe を用いて膝や首の角度について分析した。首の角度の変化は歩行補助具の装着時の効果が継続していることを示していた。撮影時に手前側と奥行方向の違いにより角度が変化しているため角度が入れ替わっている。これらの結果は市販の歩行分析ソフトの結果とほぼ一致した。

MediaPipe を用いた分析では歩行を撮影した角度を考慮しないと十分な成果が得られないことも分かった。



図 6. 歩行補助具装着時

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 1.堀 和芳,内田 恭敬,船山 朋子,弓削 美佐子,篠塚 信子,井上 雅裕,木暮 嘉明	4. 巻 3
2. 論文標題 圧力センサアレイを用いた透析前後の歩行変化の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 医工学治療	6. 最初と最後の頁 -
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 2.T. Funayama, Y. Uchida, and Y. Kogure	4. 巻 -
2. 論文標題 Assessment of Walking Condition Using Pressure Sensors in the Floor Mat	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IARIA, Global Health 2022	6. 最初と最後の頁 7-12
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 3.Y. Uchida, T. Funayama, Y. Kogure	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation of the Application of MediaPipe to Gait Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IARIA, Global Health 2022	6. 最初と最後の頁 1-9
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 無
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 5.T. Funayama, Y. Uchida and Y. Kogure	4. 巻 259
2. 論文標題 Detection of Motion Restriction with Smart Insoles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensos and Transducers	6. 最初と最後の頁 61-68
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 無
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 6.Y. Uchida, T. Funayama, K. Hori, M. Yuge, N. Shinozuka and Y. Kogure	4. 巻 259
2. 論文標題 Possibility of Detecting Changes in Health Conditions using an Improved 2D Array Sensor System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensos and Transducers	6. 最初と最後の頁 29-36
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 無
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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 T.Funayama, Y.Uchida, Y.Kogure
2. 発表標題 Monitoring of Daily Health-Condition with Wearable Device and Network
3. 学会等名 24th rehabilitation World Congress 2021, Aarhus, Denmark, abstract book, p.103 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田恭敬、船山朋子、木村亮太、相馬大作、木暮嘉明
2. 発表標題 スマートインソールにおける圧力センサ数と体調変化検出に向けた検討
3. 学会等名 ヒューマンインタ-フェース学会研究報告集 Vol.24 No.1 SIG-ACI-29, pp.85-86
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田恭敬、船山朋子、堀 和芳、弓削美佐子、篠塚信子、木暮嘉明
2. 発表標題 圧力センサアレイを用いた体調変化測定システムの特徴量抽出
3. 学会等名 ヒューマンインタ-フェース学会研究報告集 Vol.24 No.1 SIG-ACI-29, pp.79-82
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 T.Funayama, Y.Uchida, Y.Kogure
2 . 発表標題 Assessment of Walking Condition Using Pressure Sensors in the Floor Mat
3 . 学会等名 global_health_2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Uchida, T. Funayama, and Y. Kogure
2 . 発表標題 Investigation of the Application of MediaPipe to Gait Analysis
3 . 学会等名 global_health_2022 (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Funayama, Y. uchida and Y. Kogure
2 . 発表標題 Assessment of Motion Restrictions Using Smart Insoles
3 . 学会等名 Proceedings of the 8th International Conference on Sensors and Electronics Instrumentation Advances (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 5.Y. Uchida, T. Funayama, K. Hori, M. Yuge, N. Shinozuka and Y. Kogure
2 . 発表標題 Health monitoring system using a pressure sensor 2D array placed on floor mats
3 . 学会等名 Proceedings of the 8th International Conference on Sensors and Electronics Instrumentation Advances (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 内田恭敬, 船山朋子, 金子 悠, 木暮嘉明
2. 発表標題 インソール型圧力センサの最適位置への検討
3. 学会等名 第199回ヒューマンインタフェース学会研究会 (SIG-ACI-31)
4. 発表年 2023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	本間 信生 (Honma Nobuo) (20252017)	帝京科学大学・医療科学部・教授 (33501)	
研究分担者	大久保 英一 (Okubo Eiichi) (30529722)	帝京短期大学・帝京短期大学・准教授 (42639)	
研究分担者	船山 朋子 (Funayama Tomoko) (20460389)	帝京科学大学・医療科学部・准教授 (33501)	
研究分担者	堀 和芳 (Hori Kazuyoshi) (60850302)	帝京科学大学・生命環境学部・准教授 (33501)	
研究分担者	浅野 泰仁 (Asano Yasuhito) (20361157)	東洋大学・情報連携学部・教授 (32663)	

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
---------	---------