

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03280

研究課題名（和文）非接触歩行計測法とAIを用いた高齢者の認知症の兆しを捉える客観的評価ツールの開発

研究課題名（英文）Development of an objective evaluation tool that captures signs of dementia in the elderly using non-contact gait measurement technique and artificial intelligence

研究代表者

栗田 耕一（Kurita, Koichi）

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：90455171

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は高齢者の認知症等の疾病による歩行機能低下を検知することを目的として行われた。本研究ではまず、被験者に一切装置を装着せずに自然な歩行を検出するための超高感度静電誘導センサを開発した。さらに、歩行障害を模擬するため、健康者の右足首にアンクルウエイトを装着し、その重さに応じた4つのタスクの歩行信号を検出した。その結果、畳み込みニューラルネットワークによる平均識別率は83.0%であることを明らかにした。この結果から、歩行動作により出現する左右の歩行の僅かな非対称性を非接触で簡便に検出可能であることを確認し、認知症の初期で現れる小刻み歩行等の歩行機能評価技術として有望であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、歩行動作により誘起される静電誘導電流を検出することにより、認知症や片麻痺等の高齢者の歩行機能の低下をAIを用いて識別する手法に学術的意義がある。歩行動作により誘起された静電誘導電流には、被験者の足の接地・離地の際の床に対する足裏接触面積の時間微分に相当する詳細な情報が含まれている。提案手法を用いることで、非接触かつ無装着で歩行動作の僅かな差異を簡便に得ることができることを明らかにした。これにより、従来の歩行パラメータによる評価に比べて高精度な歩行動作の検出が可能となり、高齢者の健康状態の変化の「兆し」を捉える客観的評価ツールとして期待でき、社会的な意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research was to develop a technique to detect the signs of dementia in elderly people from the decline in walking function. To achieve this, we first developed an ultrasensitive electrostatic induction sensor. Furthermore, using the walking signals detected by the electrostatic induction sensor as learning data, deep learning was performed to detect left-right asymmetry in walking movements, and hemiplegia walking movements, and to identify the degree of disability. To simulate gait disorders, an ankle weight was attached to the right ankle of a healthy person, and gait signals for four tasks were detected depending on the weight of the ankle weight. As a result, it was revealed that the average classification accuracy rate using a convolutional neural network was 83.0%. As a result, we were able to confirm that the slight asymmetry between left and right gait that appears during walking motion can be easily detected without contact.

研究分野：計測工学

キーワード：歩行計測 認知症 非接触計測 静電誘導

1. 研究開始当初の背景

厚生労働省によると 65 歳以上の高齢者人口は、2015 年には 3395 万人であったが、その後も増加し、2042 年に 3878 万人でピークを迎え、2060 年には高齢化率は 39.9%に達し、2.5 人に 1 人が 65 歳以上となる。一方で、高齢化に伴い認知症患者数は年々増加しており、2025 年には 780 万人にのぼると予想されており、高齢者の 5 人にひとりが認知症という時代が目前に迫りつつある。今後の高齢化率の増加に伴い認知症患者数の爆発的増加が懸念される。

認知症とは、後天的な脳の障害によって認知機能が低下し、日常生活・社会生活に支障をきたした状態を指す。認知能力の低下は、高齢者の活動範囲を大幅に制限し、日常生活活動 (ADL) や生活の質 (QOL) の低下や施設入所率の増加を引き起こす。また、認知症は突然発症するものではなく、正常な状態から徐々に認知機能が低下し、軽度認知障害 (MCI : Mild Cognitive Impairment) を経て認知症に至る。従って、認知機能が低下している場合には日常生活に支障がなくとも、何かしらの症状があらわれている可能性がある。そのような軽度認知障害の時点で早期に発見・診断できればより効果的なサポートを行うことができるだろう。

そこで、ADL や QOL の維持や介護予防を実現するためには、高精度で客観的な認知能力の評価方法に焦点をあてた研究が必要である。これにより、認知症や片麻痺に至る前に対策が取れば患者数の増加に歯止めをかけることができる。そのためには、我々は歩行動作に着目し、認知症や片麻痺等の不自由歩行の「兆し」を簡便かつ客観的に評価できる技術の開発が重要であると考えている。従来から行われている歩行パラメータに基づく評価に加えて、歩行信号をデータ処理して深層学習により歩行能力を定量評価することにより、歩行機能の僅かな変化を「見える化」することにより不自由歩行の「兆し」を捉えることが必要である。

2. 研究の目的

本研究は高齢者の不自由歩行の「兆し」を歩行機能の低下から検知する技術を開発する。これを実現するため、我々が開発した超高感度静電誘導電流検出技術を用い、被験者に一切装置を装着することなく歩行動作を検出する。さらに、静電誘導センサで検出した歩行信号を学習データとして、機械学習(信号の特徴量に基づき識別するカスケード分類器)や深層学習(CNN 等)を行う。さらに、深層学習により左右の歩行の非対称性の検出を試みる。また、現場での使用を想定した客観的評価ツールのシステム化を実現する。

3. 研究の方法

本研究では歩行データの蓄積と深層学習による歩行障害識別の検証を行うため、検出距離 3m の超高感度静電誘導センサを用いて歩行データを蓄積した。さらに、得られた歩行データから学習モデルを構築し歩行の不自由の程度の識別を実施した。

(1) 静電誘導センサの製作と歩行データの蓄積

歩行動作による人体電位の変動は一般に数 10V 程度と微弱であるため、静電誘導センサの感度を従来の 10 倍向上させたセンサを製作した。図 1 は本研究で使用した歩行波形検出システムである。円の中心に超高感度静電誘導センサを配置し、被験者には円周上を歩行してもらうことによりほぼ均一な強度の歩行信号を連続的に取得することが可能となった。

(2) 深層学習による歩行の不自由の程度の識別の検証

超高感度静電誘導センサで得られた歩行信号を周波数解析 (FFT、Wavelet 変換等) することにより、歩行信号の不自由の程度を識別する。歩行信号の Wavelet 変換で得られたスカログラムの特徴を識別する AI としてカスケード分類器や畳み込みニューラルネットワーク (CNN) 等の深層学習を用いて識別を試みた。

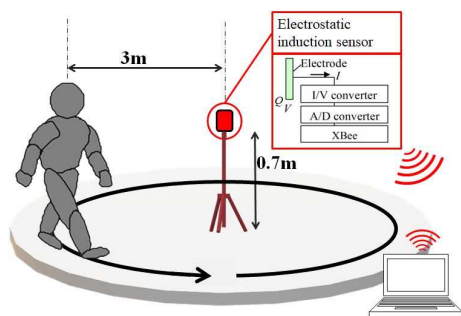


図1 歩行信号検出システム

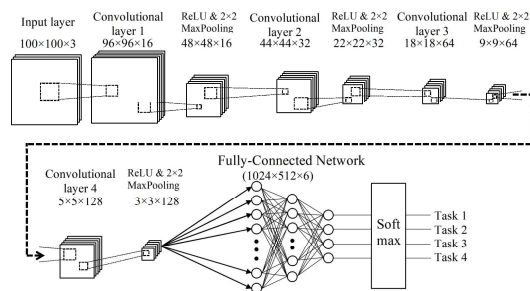


図2 畳み込みニューラルネットワークの構造

(3) 学習モデルの構築と深層学習の識別根拠の検証

深層学習による歩行の不自由の程度の個人固有の特徴を歩行信号波形のスカログラムを学習データとして、深層学習により歩行機能障害の僅かな差を識別する学習モデルを構築した。

さらに、識別根拠の検証として入力感度分析(Sensitivity Analysis)や出力側から CNN の逆経路を辿る分析法(Deconvolution/LRP)を用いて識別根拠の明確化を試みた。

(4) 歩行動作の不自由度を識別する客観的評価ツールの構築

臨床でも容易に使用可能な小型評価ツールを製作し、有効性を検証する。装置は超高感度静電誘導と学習モデルがインストールされたラップトップ PC であり設置面積は 300mm×300mm 以下の小型システムを製作した。

4. 研究成果

電極に誘起される pA 程度の微弱な誘導電流は、自作した静電誘導センサで検出した。まず、センサ内部ではこの誘導電流を I-V コンバータで電圧に変換する。誘導電流は pA 程度と微弱なため、I-V 変換には入力オフセット電圧 $40\ \mu\text{V}$ 、入力オフセット電流 1pA の低ノイズのオペアンプを使用した。微弱な電流を増幅するため、オペアンプの帰還抵抗 R_f は $3\text{T}\Omega$ に設定した。また、I-V 変換の変換比率は約 3V/pA に設定した。歩行動作により誘起される静電誘導電流は微弱なため、商用電力等のハムノイズの影響を強く受ける。そのため、屋内で実験を行う場合は、商用電力による 60Hz のノイズが計測する信号に与える影響を無視することができなくなる。そこで、カットオフ周波数 20Hz のローパスフィルタと 60Hz のノッチフィルタを挿入してハムノイズを除去した。人体動作による信号の周波数が 20Hz 以上になることは稀であるため、 20Hz のカットオフ周波数は歩行動作の計測に影響を及ぼさないと考えている。また、データはサンプリング周波数 100Hz で取得し、XBee を用いて PC に無線送信した。

歩行計測では 10 名の健常男性 (22~24 歳) に同一の運動靴 (靴底がウレタン製) を履いてもらい、図 1 に示すように静電誘導センサを中心に半径 3.0m の円の上を自分のペースで 3 分間歩行運動してもらった。また、静電誘導センサは三脚で固定し床から 70cm の位置に配置した。また、被験者 10 名の体重は 52kg から 90kg の範囲にあり、平均体重は 65kg である。被験者には不自由歩行の一例である片麻痺歩行を模擬するため、無負荷の通常歩行 (タスク 1)、被験者の体重の 2% のアングルウエイトを右足首に装着した歩行 (タスク 2)、体重の 4% のアングルウエイトを右足首に装着した歩行 (タスク 3)、体重の 6% のアングルウエイトを右足首に装着した歩行 (タスク 4)、負荷を装着する足を右足に選定した理由は、脳卒中による片麻痺が左片麻痺に比べて右片麻痺がやや多いからである。

図 3 は被験者 A の通常歩行動作により誘起された静電誘導電流波形 (上図) と、それを Wavelet 変換して得られたスカログラム (下図) である。静電誘導電流波形には歩行動作による周期的な信号が検出されている。正のピークは Terminal stance 付近の踵の離床で足裏接地面積が大きく減少するため、正のピークが検出されている。また、この波形には左右の足の固有の特徴が周期的に表れていることが分かる。

図 3 の下図のスカログラムの縦軸は周波数を示しており対数で表示されており、信号の強度は色階調で示している。スカログラムには静電誘導電流波形のピークに対応した位置に強い信号が検出されていることが分かる。このスカログラムに現れる信号形状には、被験者 A の通常歩行における歩行の特徴量が示されている。そこで、本研究では歩行動作により誘起される静電誘導電流を Wavelet 変換してスカログラムに画像化し、CNN を用いた識別を試みた。

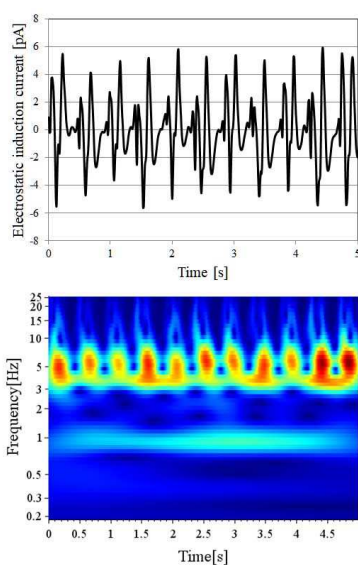


図 3 歩行波形 (上図) とスカログラム (下図)

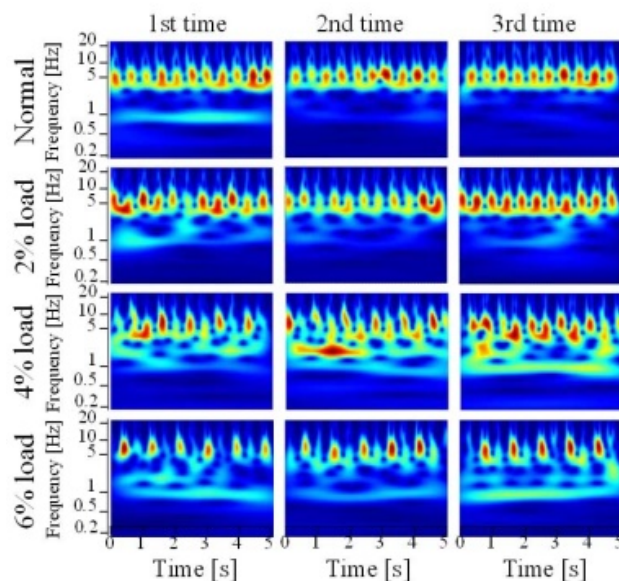


図 4 被験者 A の模擬片麻痺歩行波形の再現性

図 4 は被験者 A の 4 つのタスクで得られた静電誘導電流波形の再現性を確認した結果である。この図の一番上は通常歩行で得られた波形である。異なる日時に 3 回計測を行った結果を横に並べて示している。これらの 3 枚のスカログラムを比較すると再現性があることが分かる。同

様に、タスク 1 (2% 負荷)、タスク 2 (4% 負荷)、タスク 3 (6% 負荷) で得られた結果の再現性を示しているが、これらの結果も再現性を確認することができた、この結果から、タスク 1 の通常歩行では左右の足の接地と離地に伴う信号強度が概ね同等であるが、負荷が増すことによりスカログラムのパターンに変化が生じ、片麻痺歩行動作の特徴である左右下肢の非対称性が現われていると考えられる。また、タスク 2 (4% 負荷) とタスク 3 (6% 負荷) では 1Hz から約 4Hz の間の周波数領域にまだらな信号が出現していることが分かる。

本研究では歩行動作により得られた静電誘導電流波形を Wavelet 変換して得られたスカログラムを用いて CNN による識別を試みた。

Wavelet 変換の母関数には Complex-Morlet 関数を採用した。ひとりの被験者の一つのタスクで得られた 180 秒の歩行データから、時間幅 5 秒のスカログラムを 1750 枚生成した。4 つのタスクで得られた波形も同様にスカログラムに変換することにより、4 つのタスクの総スカログラム数は 7000 枚となった。このスカログラムを用いて 5 分割交差検証を行い各タスクの識別精度を求めた。本研究で用いた CNN のモデル構造は図 2 に示したとおりである。この CNN の構造は畳み込み層とプーリング層を交互に 4 層ずつ繰り返し、3 層の全結合層を通過した後 Softmax Cross Entropy を経て出力するように定義した。入力ノード数は 3 とし、縦横 100×100 ピクセルサイズのスカログラムの RGB 情報を用いた。畳み込み層はパディングを使用せず、フィルタサイズを 5×5、ストライド幅を 1 と定義した。畳み込み層のノード数は 1 層目が 16 個、層が進むごとにノード数を倍に増やし 4 層目では 128 個とした。プーリング層は 2×2 の最大値プーリングを行ない、活性化関数には ReLU (Rectified Linear Unit) を使用した。また、最適化アルゴリズムには Adam を用い、バッチサイズ 50 のミニバッチ学習を行なった。これらのモデルを用いて被験者毎に負荷歩行動作識別モデルを作成し、5 分割交差検証による汎化性能の評価を行なった。

図 5 は 10 名の被験者により得られた、タスク 1 からタスク 4 までの模擬片麻痺歩行動作により誘起された静電誘導電流波形のスカログラムを示している。タスク 1 の通常歩行により得られた各被験者のスカログラムを比較すると個人固有の特徴を示していることが分かる。これは、歩行動作における足の接地や離地のタイミングには個人固有の特徴があるためである。被験者 A, B, G, I は右足に装着された負荷が増加するに伴い左右の歩行の対称性が変化していることが確認できる。一方、他の被験者はスカログラムを見る限り、負荷の増加による左右の歩行の対称性の変化は明確に確認できない。これは、各被験者のタスクに対する耐性に個人差が存在することを示唆している。

本研究では、深層学習により被験者の右足の負荷の影響が歩行波形に出現する程度の識別を試みた。まず初めに、CNN の手法を用いて識別を行なった。得られた結果を図 6 に示す。これは被験者毎に学習モデルを構築して識別正答率を求めた結果である。この結果から、4 つのタスクの識別率は被験者に依存することが分かった。これらの結果の中でも、被験者 A, B, C, G, I, J の識別率は比較的高く、タスク 4 (6% 負荷) の識別率が高いことが特徴である。一方、被験者 D, E, F, H の 4 名の被験者は識別率が低い。この理由として被験者の身体能力の高さが影響していると考えられる。特に、被験者 F (22 歳) は 10 歳頃から屋外スポーツを継続して続けているスポーツ経験者であるため筋力があり、体幹能力も高いためと考えられる。

図 7 は歩行動作により誘起された静電誘導電流波形を LSTM の手法を用いて識別を行なった結果である。LSTM は CNN のような Wavelet 変換等の前処理が不要となるため、学習モデルが構築されれば、ほぼリアルタイムに識別が可能となる利点がある。LSTM で得られた結果は CNN で得られた結果と同様に、被験者 A, B, C, G, I, J の識別率は比較的高く、タスク 4 (6% 負荷) の識別率が高いことを示している。また、被験者 D, E, F, H の 4 名の被験者は識別率が低い。

CNN と LSTM の平均識別正解率は被験者に依存することが明らかになった。各被験者の学習モ

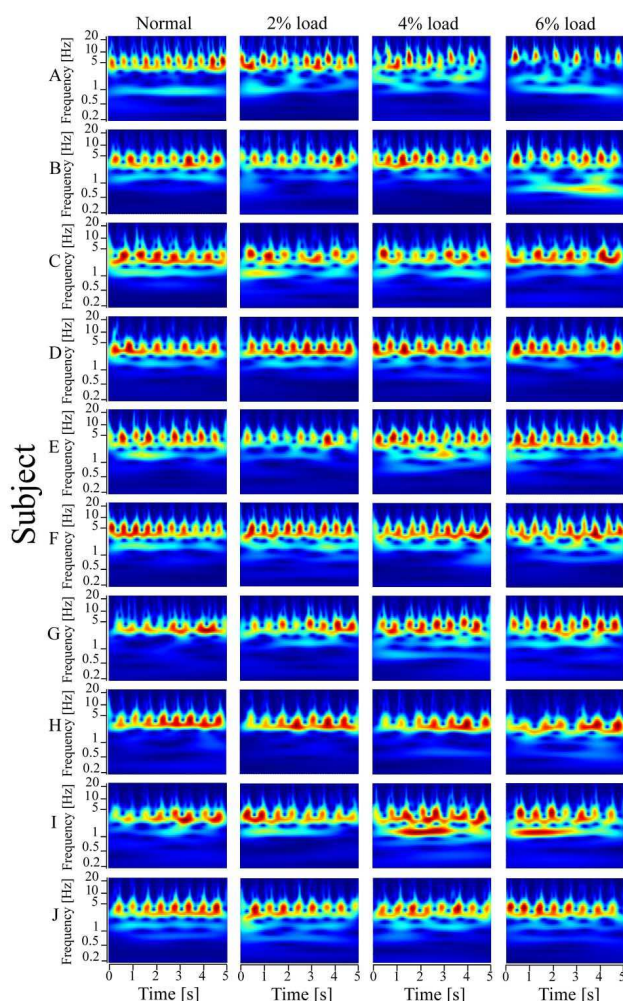


図 5 模擬片麻痺歩行波形のスカログラム

モデルにより得られた CNN の平均識別正答率の平均値は 83.0% である。一方、LSTM の平均識別正答率では 81.2% であることが分かり、いずれの深層学習モデルを使用しても平均で 80% 程度の識別が可能であることが明らかになった。

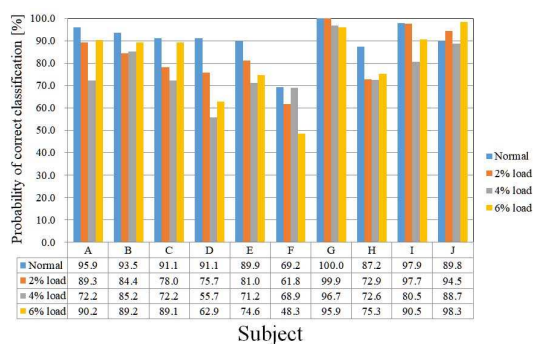


図 6 CNN による識別結果

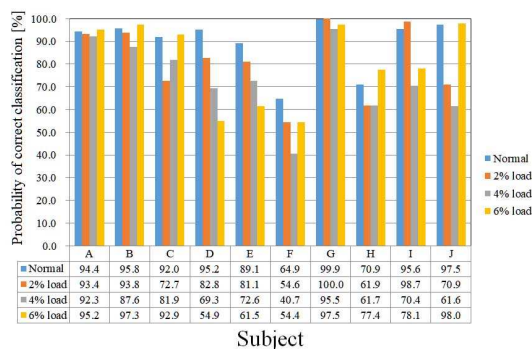


図 7 LSTM により得られた識別結果

片麻痺不自由歩行を模擬した 4 つのタスクの歩行運動により誘起される静電誘導電流波形を非接触で計測し、深層学習により歩行動作の識別を試みた。その結果、右足にアンクルウエイトを装着して右片麻痺を模擬した歩行動作により得られた静電誘導電流波形には歩行の不自由の程度が反映されていることを明らかにした。深層学習の識別には CNN と LSTM を用いたが、いずれの手法も平均識別正答率が 80% 以上であることが分かった。

さらに、識別精度は被験者に依存することが分かった。この原因は被験者の運動能力のスキルの差異によるものと考えられる。本研究結果から認知症や脳卒中などの片麻痺により歩行動作に非対称性が生じた場合には、被験者にセンサ等の装置を装着することなく簡便に片麻痺歩行を検出することが可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 栗田 耕一
2. 発表標題 超高感度静電誘導センサとAIを用いた模擬片麻痺歩行動作識別技術
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平野 勝大, 栗田 耕一
2. 発表標題 超高感度静電誘導と深層学習による負荷歩行動作識別システムの開発
3. 学会等名 第32回計測自動制御学会中国支部 学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平野 勝大, 栗田 耕一
2. 発表標題 超高感度静電誘導センサと深層学習を用いた模擬片麻痺歩行動作の非接触識別技術の開発
3. 学会等名 2023年度(第74回)電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗田 耕一
2. 発表標題 超高感度静電誘導センサと AI を用いた負荷歩行動作の識別技術
3. 学会等名 日本機械学会 第34回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢野大靖, 平野勝大, 栗田耕一
2. 発表標題 静電誘導センサと AI を用いた腕振りの程度が歩行動作に及ぼす影響の評価技術
3. 学会等名 2022年電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野勝大, 矢野大靖, 栗田耕一
2. 発表標題 高感度静電誘導センシング技術を用いた負荷歩行動作の非接触識別手法の開発
3. 学会等名 2022年度電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野勝大, 矢野大靖, 栗田耕一
2. 発表標題 高感度静電誘導と深層学習を用いた不自由歩行動作識別技術の開発
3. 学会等名 第31回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田耕一, 平野勝大
2. 発表標題 超高感度静電誘導センサとAIを用いた不自由歩行動作識別技術の開発
3. 学会等名 LIFE2022 日本機械学会 福祉工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栗田耕一, 松本洸太
2. 発表標題 超高感度静電誘導センサを用いた腕振り動作が歩行に及ぼす影響の識別技術
3. 学会等名 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichi Kurita
2. 発表標題 Classification Technique for Degree of Inconvenient Walking using Non-contact Walking Motion Measurement Technique
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢野大靖, 松本洸太, 栗田耕一
2. 発表標題 高感度静電誘導とAIによる前かがみ歩行動作識別技術の開発
3. 学会等名 第30回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 洸太, 栗田 耕一
2. 発表標題 電誘導センサを用いた非接触歩行動作計測技術とAIを用いた解析
3. 学会等名 2021年電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗田 耕一
2. 発表標題 超高感度静電誘導を用いた負荷歩行動作の非接触検出技術
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 栗田 耕一 (担当:分担執筆, 範囲:267~276ページ)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 559
3. 書名 生体センシング技術の開発とヘルスケア、遠隔診断への応用	

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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