

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K12655  
研究課題名（和文）膝関節音・バランス能力から運動器症候群を予知/予防するAI診療システムの開発  
  
研究課題名（英文）Development of AI medical care system that predicts / prevents locomotive syndrome from the characteristics of knee joint acoustic and body-balance.  
  
研究代表者  
長尾 光雄（NAGAO, Mitsuo）  
  
日本大学・工学部・研究員  
  
研究者番号：90139064  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：膝関節揺動運動特性は体幹バランス特性と強い相関を認めた。AIデータの提供は、標準的な変形性膝関節症に対する疾患特異的な評価尺度の回答と診療データを仮想データとした。少ないデータ量で効率的に高い精度を達成する機械学習技術を提案し、認識率は60%から94%以上に改善した。これにより、運動機能症候群の予知/予防に資する成果を得た。膝関節揺動運動の計測は貼付け型の慣性・音響を一体化したセンサである。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：体幹バランスと膝関節揺動運動の相関を認める計測因子と解析方法の成果は、生体信号計測デバイスの小型化に利する。診療データの標準化によりAI技術の進化で診療に工学的なエビデンスの活用が期待できる。

社会的意義：予知/予防の視点から、フレイル・介護予防等のリスク管理、包括的な循環型リスク診療管理・健康づくりに関わる医療・ヘルスケア事業関係者には簡便に計測できるデバイスとして活用できる。

研究成果の概要（英文）：A strong correlation was observed between wobbly knee joint and trunk balance. The AI data is virtual data based on responses to standard disease-specific rating scales for knee osteoarthritis and clinical data. We proposed a machine learning technology that efficiently achieves high accuracy with a small amount of data, and improved the recognition rate from 60% to over 94%. As a result, we obtained results that contribute to the prediction/prevention of locomotive syndrome. The wobbling motion of the knee joint is measured using a combined inertial and acoustic pasted sensor.

研究分野：計測・生体医工学

キーワード：運動器症候群 膝関節音 WOMAC Small Data バランス能力 AI

## 1. 研究開始当初の背景

人生 100 年と言われる長寿社会の到来が叫ばれている。誰もが楽しく社会の一員として有意義な締め括りを描いている。現状は、令和元年高齢社会白書<sup>(1)</sup>の提言のように、高齢者が増加している現状の課題が広範囲にわたり示されている。高齢者が経済活動を持続するためには、良好な社会システムの知財を知り活用する術が持てない、その多くは身近に感じる行政サービスの実感が湧かないなど、様々な格差が顕在化<sup>(2)</sup>している。

高齢者が自立した生き甲斐を描き実践するには、健康な心身が維持できる社会システムと自己研鑽は必要である。そこで『歩けるからだづくり+心身の健康』の持続・回復と考えている。これの診療や研究<sup>(3)</sup>は多岐にわたる分野があり、優先課題であることが分かる。医学会では健康寿命にロコモ予防が提唱され、実践活用されている。この研究の発展的な意義は、歩行長寿は自らの意識でコントロールできることを広く認知させる効果、100 年人生に備えた「からだづくり」を幼児の時代から維持継続する社会環境整備の拡張まで含まれる。

本研究のアイデアは、健常膝、高齢膝、および膝 OA 膝の 3 形態に伴う関節面の音響信号<sup>(4)</sup>、バランス機能や下肢アライメントにも独自の特徴が観察されている。これの先には、医学会や業界が提唱する予知/予防に活かすことで、高齢者に限らず地域住民が自発的にいつでもどこでもトータル・ロコモ・ケアシステムが享受できる日常を描いている。

### ・参考文献

- (1) 内閣府；令和元年高齢社会白書，平成 30 年度 高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況。
- (2) 長尾；歩行長寿は「ふくしま」から，財界ふくしま，Vol. 48，No. 7，pp. 121/135，2019。
- (3) 長寿医療研究センター；ロコモフレイルセンター，  
[https://www.ncgg.go.jp/hospital/locomo\\_frail/overview/index.html](https://www.ncgg.go.jp/hospital/locomo_frail/overview/index.html)
- (4) 長尾；関節音から変形性膝関節症を予知予防し歩行長寿社会を実現する，地域ケアリング，Vol. 21，No. 11，pp. 64/67，2019。

## 2. 研究の目的

AI 技術によるロコモ度と膝 OA 膝の進展度を判別し、その予知/予防に関わる診断と治療の処方箋を提示する計測診療システムの提案である。また、AI による判別の妥当性を臨床の立場から検証し、これを AI にフィードバック学習させ、判別精度の向上も図る。そこで本研究の目的は、前記の進展度判別において、臨床学的診療情報の特徴づける工学的数値情報に変換融合させる新たな技術の研究開発を進める、予知/予防に関わるスクリーニング検査試行基準設定と AI の認識率向上である。

## 3. 研究の方法

(1) 工学的な数値情報の取得・BJAS デバイスの試作開発 … ①膝関節の屈伸は座位からの立座り動作である。②音響信号は試作 BJAS (Bone joint acoustic sensor) を用い、各膝関節に 3 ヶ所、その角度も計測する。③BJAS は無線化を実現し、その性能及び改良により信号の強弱を数値化する。④体幹バランスは重心動揺から IPS や安定性限界を求める。⑤新規に下肢アライメント FTA を設定し測定から歪みを求める。⑥ロコモチェックは新規の調査で代用する。⑦ADL の評価、下肢の異常や痛み度合いを数値化する。⑧AI 判定要素の分類は被験者、若年者、高齢者、及び膝疾病有病者の 4 群から構成、パイロット数 20 名以上を想定し、②～⑦を提供する。そこから一次と二次の予防に関わるスクリーニング検査のカットオフ値またはしきい値を想定する。

(2) 臨床学的診療情報の取得 … ①専門医師が膝関節症の問診、撮像 (X 線、MRI) とその進展分類、例えば KL 分類などと、これらに関連づける骨棘や骨片、剥離軟骨など、発信に関わる特徴の抽出を行い AI 診察の要素を揃える。②診察後の治療や予防の処方箋と関連付け、AI で予知/予防の処方箋が精度よく予測する AI アルゴリズムを検討する。③同じくこの被験者に対しては、前項 (1) で示した、①、②、④～⑧も同時に行い、工学的数値情報と臨床情報を関連させる要素の貢献度とその可能性を探る。

(3) 臨床-工学の情報から AI 診療支援の開発 … ①AI の目的は少ない情報からロコモ度を予知/予防する診療システム開発を目指したアルゴリズムと関連要素構築の開発、その精度検証、検証成績から目指す診療計測システム構築である。

②AI 診療の予知/予防の精度向上には、教師データが不可欠であり、数多く臨床と工学の連携した計測事例によるデータを多く学習することを繰り返すことで、正解を導き出すルールやパターンを認識させ、新たなデータがインプットされても認識と予測が精度よく対応可能なアルゴリズム構築と開発を進める。③認識と予測の精度が高い AI コンポーネント構築後には、被験者の負担軽減、工学情報で高い質の予知/予防の診療判定デザインを進める。

(4) 被験者の計測では、倫理委員会にて承認を得て、趣旨説明、同意書に署名後、実施する。

#### 4. 研究成果

(1) 工学的な数値情報の取得・BJAS デバイスの試作開発  
 ・主な成果：①我々は、運動器症候群（ロコモ）をバランス能力と膝関節音から予知し、加えて簡便で効果的な計測システムの提案に関わる基礎研究を実施した。ロコモとバランス能力の衰退は、若年者と高齢者を対照として、表1の試験項目と重心動揺計及び足底圧分布の両特性から強い相関が見込めた例を図1に示す。一次と二次の予防に関わるスクリーニング検査のカットオフ値に変わるしきい値（TH）は、若年者の数値を健常者群の基準値と定め、これを高齢者に適用させた例である。（b）はロコモとバランス能力衰退の基準としたデータであり、膝関節の動的な挙動（a）と膝関節音の挙動（c）において、一次を超えた数値は精密検査の対象、以下は生活習慣に注意を払い、併せて二次では進んだ衰退を疑う代表的な状態を参考として上げた。

(c)において、一次を超えた数値は精密検査の対象、以下は生活習慣に注意を払い、併せて二次では進んだ衰退を疑う代表的な状態を参考として上げた。

②膝関節に付けたセンサとデータロガー用PCの送信は有線から無線に改良され、各9chが取得でき、被験者と計測者のストレス軽減は図れた。

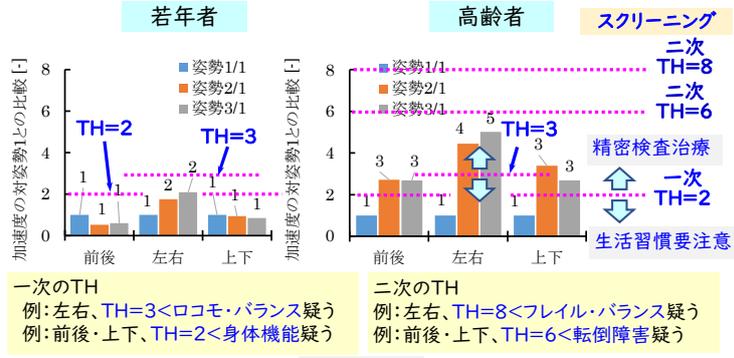
③調査1と2は、身体機能、ロコモ度、及び図1作成の基礎データであり、この度のTH設定、及びAI診断のヒントにした。

④AI用データはコロナ禍のため初期に想定したデータ数には至らず、少数データと仮想データをトランスポートし、ロコモ度、変形性膝関節症（KOA）のKellgren-Lawrence分類を想定した。

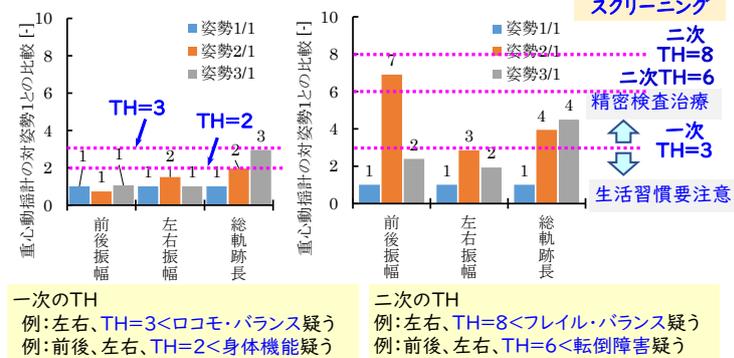
・今後：上記で得たTHの信頼度、及びAIの一致率を高め、歩行長寿リスクの予知/予防に資する診療支援システムを社会<sup>1)</sup>に還元したい。

表1 バランス試験項目

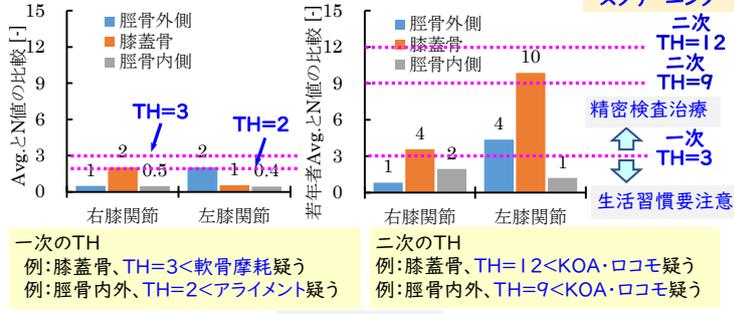
(A) 調査・1	(a) 身体幾何
(B) 調査・2	(b) 姿勢・1
(C) 筋力	(c) 姿勢・2
	(d) 姿勢・3
	(e) 屈伸運動



(a) 加速度



(b) 重心動揺計



(c) 膝関節音

図1 成果の例（身体活動スクリーニング検査、一次・二次予防、しきい値の例）

1) 株式会社 日経BP 総合研究所, 「ヘルスケアサービス提供・利用に関する意向調査」報告書, 2024年3月29日, <https://www.amed.go.jp/content/000126345.pdf>.

(2) 臨床学的診療情報の取得  
 ・主な成果：加齢によるロコモを予知/予防する計測診断方法の提案と開発を目指し、変形性膝関節症患者を対象とし、以下の臨床データを収集した上で、新規BJASデバイスによる音響測定を行う計画を立案した。

- ①被験者のロコモ関連問診
- ②症状分類
- ③膝関節画像評価内服薬
- ④既往歴
- ⑤手術歴

また、標準的な変形性膝関節症に対する疾患特異的な症状評価尺度として、Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC)による評価を行う方針であった。構成は疼痛:5項目、こわばり:2項目、機能:17項目の3グループであり、計24項目に自記式で回答する方式である。

また、画像上の変形性関節症の重症度を、単純レントゲン写真による関節裂隙の狭小化を Kellgren-Lawrence 分類を用いて複数の整形外科医により評価し、カテゴリカルデータとして回収する予定であった。

以上の臨床情報を収集した上で、変形性膝関節症患者に対する新規 BJAS デバイスによる音響信号の測定を行う計画とした。実際の症例収集と測定のため、研究責任者、分担者チーム間での対面でのミーティングを複数回行い、情報共有を図った。また、事前に収集した AI 用データ整理を行った。

しかし、2023 年 5 月までのコロナ感染症拡大防止対策や、その後の研究分担者の異動のため、研究の対象となる変形性膝関節症被験者を収集し、情報の取得と BJAS を用いた音響測定を行うことは難しかった。

### (3) 臨床情報から AI 診療支援の開発

・主な成果：運動器症候群（ロコモ）の要因である変形性膝関節症発症状態を機械学習で分類するためには通常大量のデータが必要である。被験者からのアンケートやセンサによる測定データ量には制限があり、少量のデータでも効率的に分類する方法が求められる。

本研究では、少量のデータで効率的に学習を行い、高精度な分類モデルを構築するための方法を提案して、検証実験による認識率は 94% に達成した。これが一次または二次予防のしきい値 (TH) 設定を可能とした。これにより、変形性膝関節症に起因するロコモ進行状態の診断が可能となり、早期発見と治療を通して高齢者の自立歩行の予知/予防を支援することが期待される。

・提案手法：図 2 のように、以下の五つのステップで構成される。

①データ収集：膝関節の動きを測定するために、複数のセンサ（例えば、音響・角度・加速度センサなど）を膝関節に装着し、特定の動作を行わせてデータを収集する。

②データ前処理：収集したデータを正規化し、外れ値を除去する。

③機械学習モデルの構築：データを用いて機械学習モデルを訓練する。今回は、KNN、決定木、パーセプトロンの 3 つのアルゴリズムで比較し、最も適したモデルを選択する。

④モデルの評価：交差検証を用いてモデルの精度を評価し、最適なパラメータを調整する。

⑤アンサンブル学習：複数のモデルを組み合わせたアンサンブル学習を行い、精度を向上させる。

・考察：少量のデータを用いたモデル訓練は現在主流の大量なデータを利用した訓練手法との相違点が特定できた。

①訓練用特徴値の事前選別：訓練データ数が少ないため、多次元のモデルは避けて、前処理段階では計測項目の中で、モデル訓練用項目を選別する。そこで主成分分析 (PCA) などの高次元データを低次元空間に射影する方法を選択する。

②異常値の除去：訓練用データの数が少ない場合、異常値は全体のデータ分布に大きな影響を与える。従って、前処理段階で効率的に異常値を特定する手法を提案する。ここでは、t-SNE のような高次元データを低次元に可視化する非線形次元削減手法を利用する。例えば、今回のロコモデータ（ロコモ度 2 と 3 だけ）を t-SNE より二次元にプロットした図 3 の赤線で囲ったデータのラベルはロコモ度 2、これにロコモ度 3 のデータのクラスタと混ぜている状態が目視で判断できる。ここでは、もし除去しない場合、分類モデルの訓練は少量のデータだけでは困難になり、一次または二次予防のしきい値 (TH) は想定外になる。

③訓練データの効率的な利用：交叉検証などの手法以外に、データシャッフル手法が特に過度学習を防ぐためには有効であることが検証できた。少量データの場合、データ分布の偏りは避けられないが、この手法でデータの多様性を最大限に生かし、より一般化されたモデルを作成することが可能となる。これにより、スクリーニング検査の TH 設定の信頼度は改善される。

・今後：今回のロコモ度を変形性膝関節症に関わる臨床と工学のデータから AI でロコモ度推定した解析手法は、症例が少ない疾患、その疾患管理に診療 AI として活かせる。

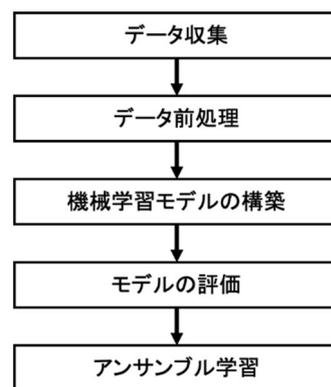


図 2 少量データを用いた効率的なモデル訓練手法

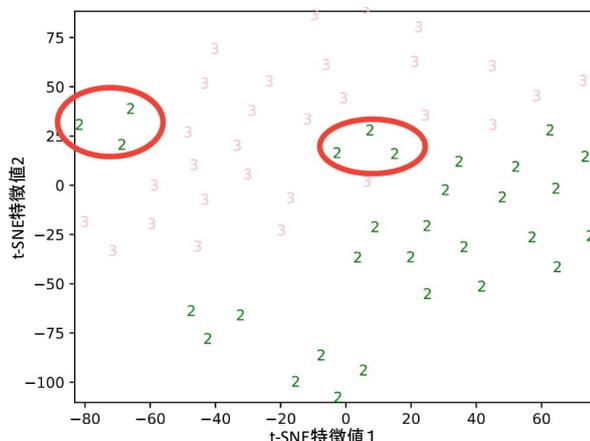


図 3 異常値は全体のデータ分布への影響(ロコモステージ 2 とステージ 3 が混ぜた例)少量データを用いた効率的なモデル訓練手法

## 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 2件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Wei Guo, Xiaoyang Liu, Chenghong Lu, and Lei Jing	4. 巻 13
2. 論文標題 PIFall: A Pressure Insole-Based Fall Detection System for the Elderly Using ResNet3D	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics13061066	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 C. Lu, Z. Dai and L. Jing	4. 巻 72
2. 論文標題 Measurement of Hand Joint Angle Using Inertial-Based Motion Capture System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement	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/TIM.2023.3237821.	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 該当する

1. 著者名 Yamagishi Shunsei, and Lei Jing	4. 巻 13
2. 論文標題 Pedestrian Dead Reckoning with Low-Cost Foot-Mounted IMU Sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 610/623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13040610	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 該当する

1. 著者名 Ryoji Tominaga, Shin Yamazaki, Shingo Fukuyama, Rei Goto, Miho Sekiguchi, Koji Otani, Masumi Iwabuchi, Osamu Shirado, Shunichi Fukuhara, Shin-ichi Konno	4. 巻 92
2. 論文標題 Association between single limb standing test result and healthcare costs among community-dwelling older adults	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Archives of Gerontology and Geriatrics	6. 最初と最後の頁 104256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.archger.2020.104256	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 Yojiro Takahashi, Satoshi Hatashita, Yumetaka Shinden, Masayuki Ito, Youichi Kaneuci, Michiyuki Hakozaki, Shinichi Konno	4. 巻 35
2. 論文標題 Periprosthetic Fracture Resembling Atypical Femoral Fracture After Fixation With Retrograde Intramedullary Nail in Elderly Women: A Report of Two Cases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 In Vivo	6. 最初と最後の頁 1837/1842
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21873/invivo.12445	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 Kousuke Saita, Masahiko Sumitani, Takuya Nikaido, Miho Sekiguchi, Reo Inoue, Hiroaki Abe, Shinichi Konno, Kanji Uchida	4. 巻 37
2. 論文標題 Exponential correlations among neuropathic components, pain intensity, and catastrophic thoughts in patients with musculoskeletal pain disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Medical Research and Opinion	6. 最初と最後の頁 1341/1348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/03007995.2021.1929137	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 Naohiro Itoh, Toshinaga Tsuji, Mitsuhiro Ishida, Toshimitsu Ochiai, Shinichi Konno, Yuji Uchio	4. 巻 26
2. 論文標題 Efficacy of duloxetine for multisite pain in patients with knee pain due to osteoarthritis: An exploratory post hoc analysis of a Japanese phase 3 randomized study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Orthopaedic Science	6. 最初と最後の頁 141/148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jos.2020.02.013	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 長尾 光雄、岡田 浩暢
2. 発表標題 膝関節揺動と重心動揺計との相関に関わる試行
3. 学会等名 日本設計工学会 2023 年度 秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長尾 光雄
2. 発表標題 口コモを膝関節音から予測し「Well-being」な歩行長寿社会を実現
3. 学会等名 MDF2022-第1回-医工連携マッチング例会（第1回）（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田 浩暢、長尾 光雄
2. 発表標題 膝関節音から口コモ度チェック可能なセンサ開発履歴と性能比較
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾 光雄、岡田 浩暢
2. 発表標題 生体音響センシングデバイスの校正に用いる音響信号発生器の性能試験
3. 学会等名 日本機械学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾 光雄、平野 雄三、紺野 慎一、荊 雷
2. 発表標題 膝関節音・バランスから眺めた口コモ予防の早期診断支援システム構築に関する研究
3. 学会等名 メディカルクリエーションふくしま2022（第18回医療機器展示会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長尾 光雄
2. 発表標題 下肢屈伸動作からフレイルとロコモ予防の可能性に挑戦
3. 学会等名 JST-科学技術振興機構-新技術説明会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 友里也、 荊 雷
2. 発表標題 KOSIGNデータを拡張するためのData Augmentation手法の検討
3. 学会等名 NII-IDRユーザフォーラム 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 友里也、 荊 雷
2. 発表標題 敵対的学習を用いた骨格に基づく手話認識のためのデータ拡張
3. 学会等名 DEIM Forum 2023（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡田 浩暢，高田 秀太，長尾 光雄
2. 発表標題 試作した骨関節音響センサの信号特性と計測事例
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第57期秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田 浩暢, 鈴木 あゆむ, 長尾 光雄
2. 発表標題 運動型健康増進施設利用者のバランスと膝関節音響の調査
3. 学会等名 日本設計工学会東北支部設立45周年記念研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西山 里菜, 小山 虹生, 岡田 浩暢, 長尾 光雄
2. 発表標題 膝関節屈伸音計測センサの開発
3. 学会等名 日本設計工学会東北支部設立45周年記念研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑原 舜, 岸本 翼, 岡田 浩暢, 長尾 光雄
2. 発表標題 平面上を円筒接触子が往復摺動する摩擦に関する実験
3. 学会等名 日本設計工学会東北支部設立45周年記念研究発表講演会
4. 発表年 2021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	紺野 慎一  (Shinichi Konno)  (70254018)	福島県立医科大学・医学部・博士研究員    (21601)	

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
研究分担者	荆 雷  (Lei Jing)  (30595509)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授    (21602)	

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