

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20657

研究課題名（和文）ネオロコモ：俯瞰的システムから挑む運動器不全メカニズムの全貌解明

研究課題名（英文）Neolocomo: Comprehensive Understanding of Locomotor Failure from Systems Perspective

研究代表者

松井 佑介（Matsui, Yusuke）

名古屋大学・医学系研究科（保健）・准教授

研究者番号：90761495

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、歩行解析で重要な技術である二次元ビデオベース姿勢推定と筋活動に基づく運動モジュール推定の解析手法に注目しました。特に大規模集団での歩行解析の技術的誤差を特定し、解剖学的、生体力学的、物理的異常と推定誤差に対処するワークフローを開発。また、関数データ解析法を導入した新しいアルゴリズムにより、個人ベースの手法の問題を克服し、ノイズに弱い推定を改善しました。これにより、歩行解析における動作解析および運動モジュール解析の精度が向上し、研究や臨床応用に新たな可能性を提供します。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高齢化社会における運動機能障害の予防と治療への応用を目指しています。特に、大規模データを用いた二次元ビデオベースの歩行解析技術とモーターモジュールの推定精度向上は、歩行障害や運動機能低下が見られる高齢者や患者の早期診断と介入に大きく貢献する可能性があります。これらの技術により、日常的な環境下で容易に歩行データを収集し、適切な治療やリハビリテーションプログラムを迅速に提供することへの貢献が期待されます。

研究成果の概要（英文）：The study focused on the analysis methods of 2D video-based pose estimation and muscle activity-based motor module estimation, which are important techniques in gait analysis. In particular, it identified technical errors in gait analysis in large populations and developed workflows to address anatomical, biomechanical and physical anomalies and estimation errors. In addition, a new algorithm introducing functional data analysis methods overcame the problems of individual-based methods and improved noise-sensitive estimation. This improves the accuracy of movement and motor module analysis in gait analysis, offering new possibilities for research and clinical applications.

研究分野：計算健康科学

キーワード：歩行解析 ビデオベース姿勢推定 運動モジュール解析 ロバスト推定 リハビリテーション科学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ロコモティブシンドロームは認知症やメタボリックシンドロームとならんで、高齢者の寝たきりや介護の三大要因の一つである。その中でも加齢に伴う運動器不全は、寝たきりや介護を誘発する主なリスク要因である。しかし加齢に伴う運動制御の適応メカニズムはほとんど分かっていない。そこで、臨床において測定が比較的容易な動作学的データと筋活動データから、システム異常を同定する全く新しいデータ駆動型アプローチを提案することで、そのメカニズムの全貌に迫る基盤を確立する。

### 2. 研究の目的

本研究では、歩行解析で重要な技術である二次元ビデオベース姿勢推定と筋活動に基づく運動モジュール推定の解析手法に注目した。特に大規模集団での歩行解析の技術的誤差を特定し、解剖学的、生体力学的、物理的異常と推定誤差に対処するワークフローを開発した。また、関数データ解析法を導入した新しいアルゴリズムにより、個人ベースの手法の問題を克服し、ノイズに弱い推定を改善した。これにより、歩行解析における動作解析および運動モジュール解析の精度が向上し、研究や臨床応用に新たな可能性を提供することを目標とした。

### 3. 研究の方法

#### 3-1.

まず大規模な二次元ビデオベース姿勢推定データの解析基盤の構築を行った。既存の研究で提案されている解析方法はいずれも厳密に制御された環境下での動作解析を想定したもので、制御されていない環境における歩行分析のワークフローは十分に研究されていなかった。異質な環境における大規模な集団の歩行の未来を捉えるためには、ロバストなアプローチが必要であり、特に OpenPose を用いた関節推定の精度には、カメラの性能、カメラから被験者までの距離、歩行速度、衣服、歩行環境など、様々な要因が潜在的に影響すると想定される。このような環境で効率的な後処理を考える場合、大規模なデータに基づいて誤差構造を統計的に検討することが有効である。幸いなことに、近年、OpenPose 技術を利用して、10,307 人からなる歩行データベースが公開されています[18]。このデータベースには、ある施設を訪れた不特定多数の人の歩行時のポーズ推定値が、マルチビューカメラを用いて無拘束で 25 フレーム/秒 (fps) で収録されており、1 歩行周期に対して 18 関節が推定されている[18]。このデータベースは元々バイオメトリクス分野向けであるが、我々はこのデータを用いて、非制御環境における技術的異常誤差を調査し、それらを特定・補正するアルゴリズムを開発して、オープンソースソフトウェア PoseFixeR を開発した。また、シミュレーション実験と実データ解析によって精度と有用性を検証した。

#### 3-2.

次に、集団レベルにおける筋活動に基づく運動モジュール比較解析のための基盤構築を行った。運動モジュールとは、筋協調を駆動する機能的な神経生理学的コマンドの集合である。現在、運動モジュールは、非負行列分解(NMF)のような次元削減技術によって特徴づけられている。しかし、NMF は、各データセットについて、残差誤差を最小化する 2 つの行列を見つけるだけであり、得られた値は生物学的意味を持たない。このため、複数の被験者間で運動モジュールを比較したり要約したりすることは困難である。これまでの計算手法の研究では、主に個々の運動モジュールの洗練されたモデルを開発し、その推定の再現性を向上させることに焦点が当てられてきた。しかし、運動モジュールの一般性をよりよく理解するためには、集団レベルでの構造を確立することも極めて重要である。しかし残念ながら、そのための統計的・計算的手法はまだ十分に解明されていない。そこで FDA (Functional Data Analysis) の概念を借りて、集団レベルの運動モジュールを統計的に定式化した。筋活動の変動を、個人内変動と個人間変動の 2 つのレベルに分解した。個体内変動性は、歩行周期の試行間変動など、1 人の被験者内の変動を説明するもので、フィルタリングや時間アライメントなどの前処理ステップによって低減することができる。これとは対照的に、個人間変動は被験者間の違いから生じる。私たちは、母集団の特性を考慮しながら、この変動をモデル化するために FDA を使用した集団レベルの運動モジュール推定アルゴリズムを開発して実装した。また、シミュレーション実験と実データ解析によって精度と有用性を検証した。

### 4. 研究成果

#### 4-1.

大規模な二次元ビデオベース姿勢推定データの解析基盤の構築の結果について述べる。解剖学的異常、生体力学的異常、物理的異常、推定による誤差の 4 つの主要な異常タイプを特定した

(図1)。さらに、分類した誤差に対処するためのデータ処理ワークフローを提示(図2)し、シミュレーション実験を通じてその再現性を実証した(図3)。本研究で使用したフローはRパッケージとしてオンライン(URL: <https://github.com/matsui-lab/PoseFixer>)で公開した。

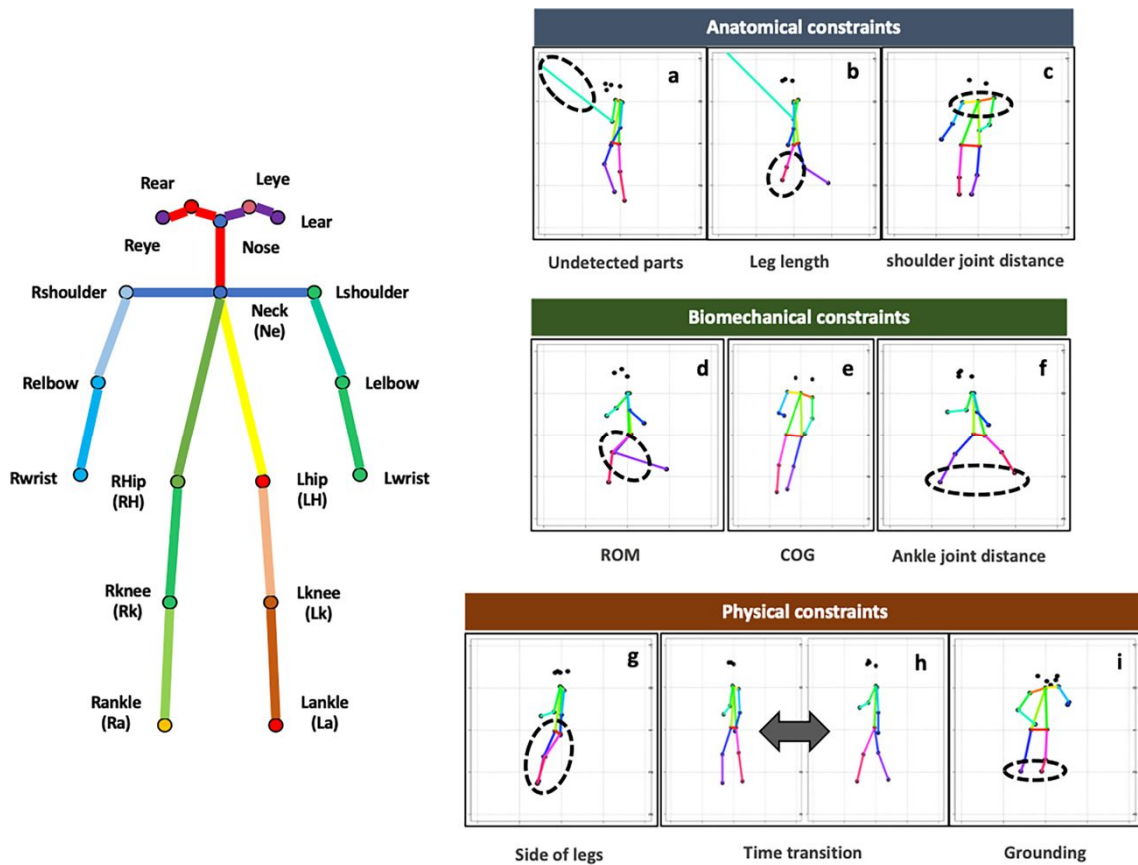


図1 OpenPose を使用した歩行時の異常の種類。左図は OpenPose の骨格モデルと各部分の名称。右図は、表1に対応する異常タイプを示す。表1の推定精度は、説明の便宜上、図から除いている。ROMは可動域、COGは重心。

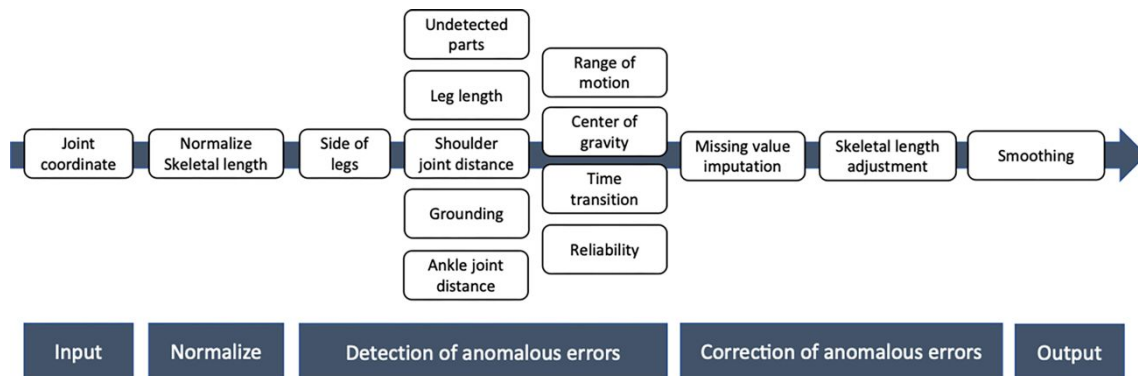


図2 提案ワークフロー

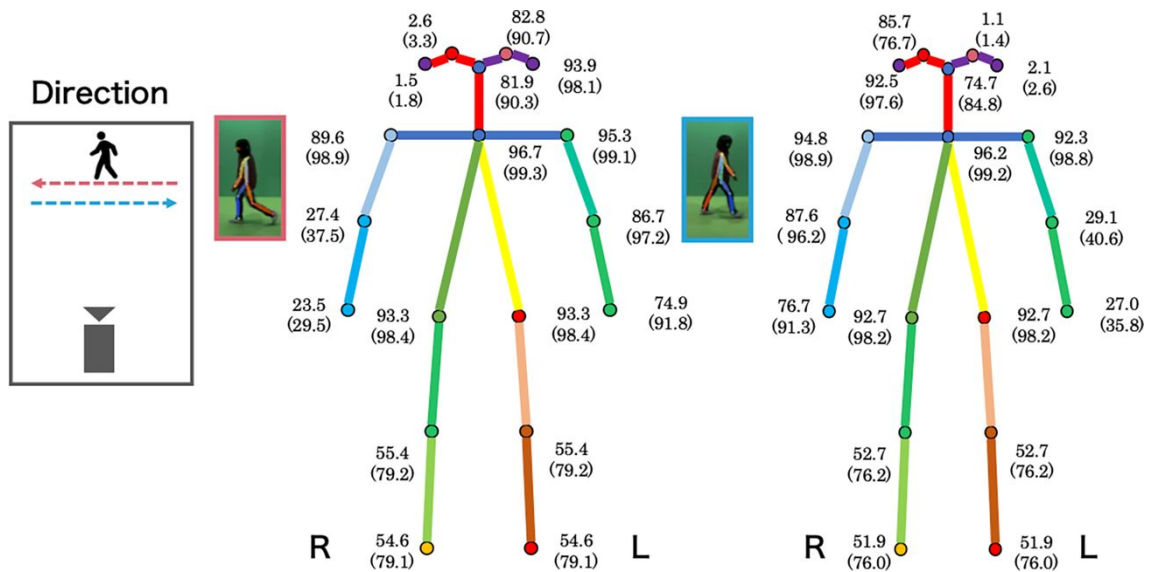


図3 OpenPose による各パーツの推定精度。異常の種類に基づく精度（すなわち、表1に示した異常のいずれをも含まない割合）を示す。括弧内の数字は、提案するワークフローを修正した後の精度である

4-2.

次に集団レベルにおける筋活動に基づく運動モジュール比較解析のための基盤構築について述べる。NMF と FDA を用いた集団レベルでの運動モジュールの不偏推定アルゴリズムを開発した（図4）。シミュレーション実験の結果、我々のアプローチは、従来方法と比較して、母集団のばらつきを考慮し、特に他の方法では収束しないような大きなサンプルサイズにおいて、運動モジュールの期待値推定における統計的誤差を減少させることが明らかになった（具体的な結果については国際誌で査読中）。

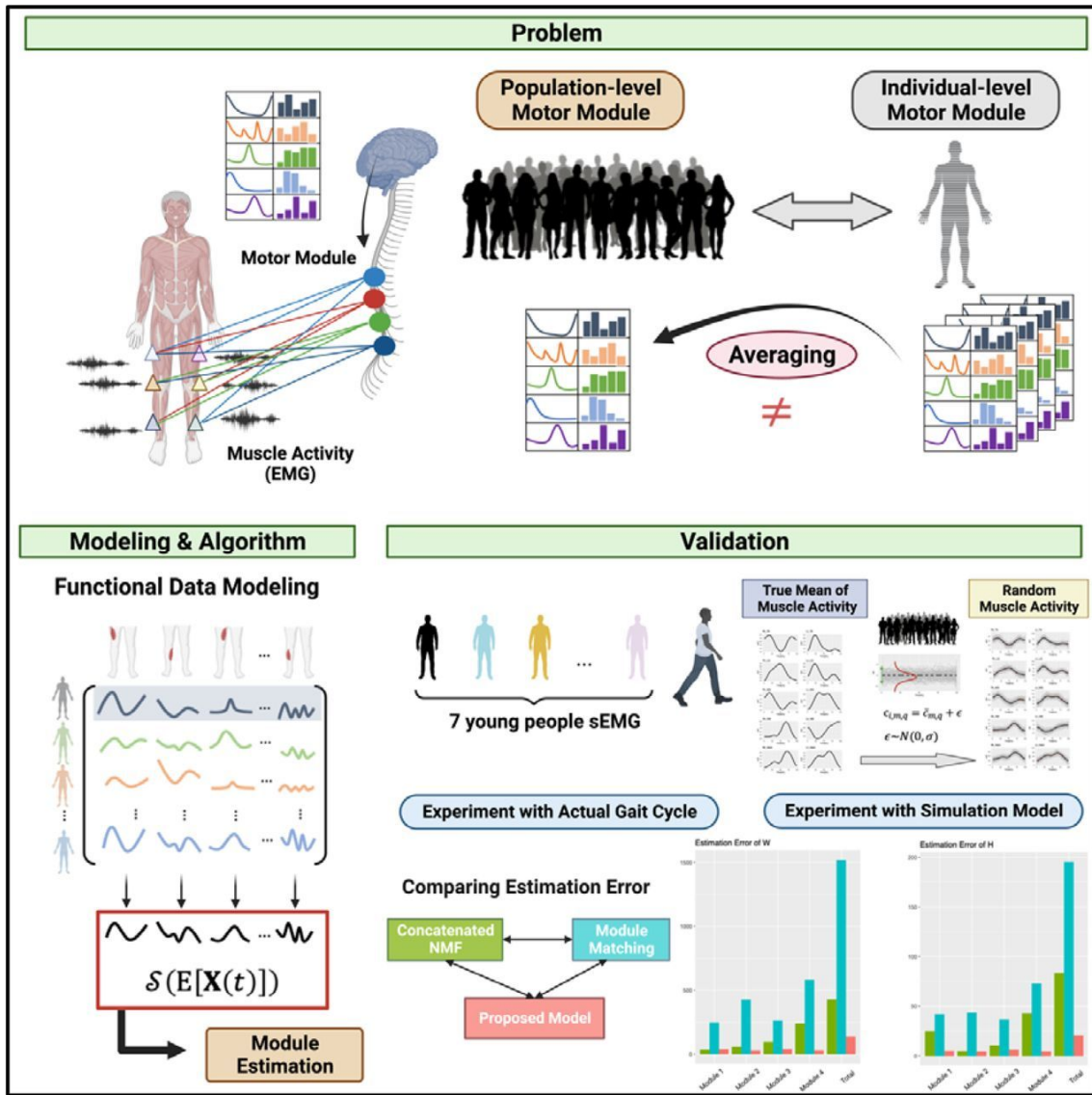


図4 研究方法の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sugiyama Yuki, Uno Kohei, Matsui Yusuke	4. 巻 19
2. 論文標題 Types of anomalies in two-dimensional video-based gait analysis in uncontrolled environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1009989
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pcbi.1009989	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 Matsui Yusuke, Uno Kohei, Nojima Ippei	4. 巻 -
2. 論文標題 Unbiased estimation of the population-level motor module	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 medRxiv	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） 10.1101/2023.06.25.23291878	査読の有無 無
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 Iijima Hirotaka, Gilmer Gabrielle, Wang Kai, Sivakumar Sruthi, Evans Christopher, Matsui Yusuke, Ambrosio Fabrisia	4. 巻 -
2. 論文標題 Meta-analysis integrated with multi-omics data analysis to elucidate pathogenic mechanisms of age-related knee osteoarthritis in mice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journals of Gerontology: Series A	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） 10.1093/gerona/glab386	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 Shimizu, Dai, Kenzui Taniue, Yusuke Matsui, Hiroshi Haeno, Hiromitsu Araki, Fumihito Miura, Mitsuko Fukunaga, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Pan-cancer methylome analysis for cancer diagnosis and classification of cancer cell of origin	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cancer Gene Therapy	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） 10.1038/s41417-021-00401-w	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 Uemura Jun ichi, Hoshino Aiko, Igarashi Go, Matsui Yusuke, Chishima Makoto, Hoshiyama Minoru	4. 巻 54
2. 論文標題 Pre stimulus alpha oscillation and post stimulus cortical activity differ in localization between consciously perceived and missed near threshold somatosensory stimuli	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 5518 ~ 5530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ejn.15388	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16件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 宇野光平;松井佑介
2. 発表標題 多群比較のための固定NMFによる筋シナジー変動解析手法の提案
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井佑介
2. 発表標題 再現性を重視した筋シナジー解析アルゴリズムの提案
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋崎航次;宇野光平;飯島弘貴;野島一平;松井佑介
2. 発表標題 歩行動作時における動的な運動モジュール構造の検討
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂田響;宇野光平;飯島弘貴;松井佑介
2. 発表標題 3次元深度カメラに基づく歩行データに対するノイズロバストな解析方法の検討
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 兒玉隼汰;飯島弘貴;宇野光平;松井佑介
2. 発表標題 骨格筋特異的な分子ネットワークに基づく遺伝子モジュールの同定および各運動様式に対する分子応答の推定
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島弘貴;松井 佑介
2. 発表標題 変形性関節症をドライブする 『老化× メカニカルストレス』分子制御の探求 メタアナリシスとシステム生物学による統合的アプローチ
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島 弘貴;松井 佑介
2. 発表標題 運動で骨格筋の脂肪を制御する 高齢者骨格筋トランスクリプトームメタ解析による システム生物学アプローチ
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 松井佑介
2. 発表標題 DX時代における理学療法学 ~ データ科学との融合へ向けて ~
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会学術大会 教育講演 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井佑介
2. 発表標題 大規模プロテオゲノミクスにおける数理解析アプローチ ~ cancer complexomeを例として ~
3. 学会等名 第72回日本電気泳動学会総 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉山雄紀、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 簡易デバイスによる超大規模歩行骨格データに対する解析基盤の開発と応用
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林勇作、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 アルツハイマー病の潜在的病態進行度を推定するための機械学習アプローチの検討
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山村稔平、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 アルツハイマー病サブタイプにおけるデータ駆動型アプローチによる空間的バイオマーカー分布構造の検討
3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉山雄紀、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 歩行分析のためのAI姿勢推定における異常誤差の検討と検出方法
3. 学会等名 2021年度日本分類学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田陽夏、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 歩行時筋活動におけるウェーブレット解析と解釈のための次元縮小アプローチ
3. 学会等名 2021年度日本分類学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 都築凜華、宇野光平、松井佑介
2. 発表標題 個々のゲノム情報を考慮した変異ペプチドに基づく異常タンパク質の同定方法とアルツハイマー病への応用
3. 学会等名 2021年度日本分類学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇野光平・池田陽夏・松井佑介
2. 発表標題 筋信号のリアルタイム解析モデル
3. 学会等名 日本計算機統計学会第35回大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松井佑介	4. 発行年 2022年
2. 出版社 理学療法	5. 総ページ数 7
3. 書名 理学療法におけるデータサイエンスとAIの利活用と課題 理学療法の教育分野におけるデータサイエンスとAIの利活用と課題	

〔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	野嶌 一平 (Nojima Ippei)  (20646286)	信州大学・学術研究院保健学系・准教授  (13601)	
研究分担者	宇野 光平 (Uno Kohei)  (50873585)	名古屋大学・医学系研究科・特任助教  (13901)	

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