

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：34417

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03311

研究課題名（和文）片麻痺歩行再建の治療指針を提供するAIシステムの基盤形成

研究課題名（英文）Building the foundations for artificial intelligence providing treatment strategies of hemiparetic gait

研究代表者

長谷 公隆（HASE, Kimitaka）

関西医科大学・医学部・教授

研究者番号：80198704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,200,000円

研究成果の概要（和文）：脳卒中片麻痺患者の生活期における活動の改善に必要なバランス能力および持久力の回復に係る歩行関連指標を、3次元歩行分析データから抽出する人工知能システムを開発し、病態に応じた運動学的治療指針を提示することが本研究の目的である。健常高齢者のデータベースを形成し、その歩行パターンとの違いを説明する歩行関連指標をサンプリングする機械学習を適用した。その結果、生活期片麻痺患者のコミュニティで求められるバランス能力と歩行持久力の問題に特徴的に関連する歩行関連指標が抽出された。治療目的に応じて着目すべき歩行パターンの特徴を抽出することで、個別のリハビリテーション治療が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

歩行再建では安定性・効率性の面から病態に応じたアプローチが必要であり、各側面についての指針が要求される。これらを区別する上で、片麻痺歩行のバランス能力と持久力を区別して捉える研究を世界で初めて実施した。個々の患者の運動学的特徴に基づいて、最適の治療あるいはケアを施設あるいは地域ごとに提示できるAI開発は重要である。特に介護場面など、リハビリテーション医療の専門家が少ない場面では有意義であり、超高齢・人口減少社会を迎えている日本の医療・介護に大きな貢献が期待できる。本研究は、歩行分析に基づく治療法選択エンジンとして、歩行再建に必要なバイオメカニクス計測の新たな臨床基盤となる研究である。

研究成果の概要（英文）：An artificial intelligence system has been developed to extract gait-related parameters from 3-dimension gait analysis data that are related to the recovery of balance and endurance abilities necessary for improving the activities of patients with hemiparesis in their life stages. We created a database of healthy elderly people and applied a machine learning to importance sampling for characterizing hemiparetic gait patterns. As a result, gait-related parameters correlating to the balance ability required and walking endurance for the activities of hemiparetic patients in community were separately extracted. The use of feature selection of quantitative biomechanical variables should allow us to provide personalized rehabilitative treatments.

研究分野：リハビリテーション医学

キーワード：片麻痺歩行 バランス能力 歩行持久力 歩行分析 機械学習 リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーション医療の役割は活動の再建であり、急性期から生活期に至る継続的な治療が必要になる。社会生活に復するために環境を整えて活動を落とし込むことも重要だが、脳卒中などの後遺障害をもたらす疾患では、そのいかなる病期においても、機能回復を目指した治療を重点化するべきである。しかし、治療方法の違いによって達成できるはずの歩行能力が獲得されない場合や、生活期リハビリテーションを受けていても回復期病院退院時に可能であった歩き方ができなくなってしまう場合がある。リハビリテーションの実施時間が同じでも、歩行能力の達成度に違いが生じるといふ学術的「問い」に対する解決策として、病態に対応した治療目標を明確に定める方略の開発が求められる。歩行訓練の治療内容は、観察による歩行分析に基づいて決定されることが多いが、片麻痺歩行などでは様々な異常パターンが出現するため、活動再建に向けて治療すべき歩行関連指標を見定めることは熟練者でも難しい。歩行速度やバランス能力の改善を得るためにアプローチすべき問題が明確になっていけば、施設や環境が異なっても治療プロセスが集約されるであろう。この仮説を検証する学術的基盤を形成するために、本研究は、歩行速度、持久力、歩行バランス改善に取り組むべき歩行指標の問題を抽出する人工知能 (artificial intelligence: AI) システムを開発する。

定量的歩行分析の臨床応用における障壁は、計測された膨大なデータから注目すべき指標を抽出するデータ削減技術であった (Wikström J, et al: Intelligent data analysis of instrumented gait data in stroke patients: A systematic review. *Comput Biol Med* 51: 61-72, 2014)。近年の定量的歩行分析は、データ削減とクラス分類あるいはクラスタリングを行う学習アルゴリズムをどのように適応するかが命題となっている (Phinyomark A, et.al: Analysis of big data in gait biomechanics: current trends and future directions. *J Med Biol Eng* 38: 244-260, 2018)。しかしながら、これまで開発されてきた AI システムは歩行機能の予測や分類についてであり (Caldas R, et.al: Adaptive predictive systems applied to gait analysis: A systematic review. *Gait Posture* 77: 75-82, 2020) 片麻痺歩行の歩行支援ロボットにおいて、アシスト量の自動調整を行う AI システムが考案されてきているものの、歩行再建に向けた運動療法の指針を多面的な歩行関連指標から抽出して提示するアルゴリズムは一般化されていない。さらに、歩行パターンの異常を修正する AI システムが必ずしも歩行能力の改善に直結するとは限らない。

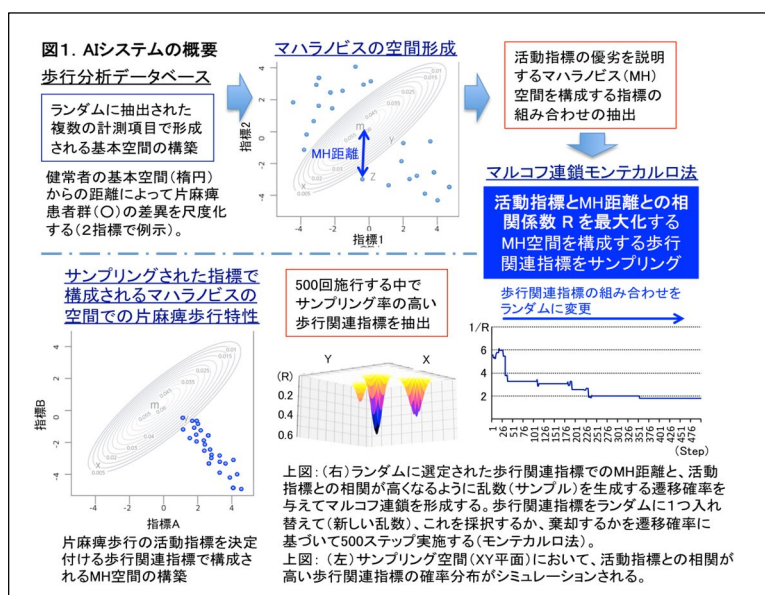
一方、歩行分析技術の進歩はめざましく、臨床ベースでの計測精度を有する3次元歩行分析はマーカースレス計測の時代に突入している。特別な計測スペースがなくても比較的手軽に歩行分析が可能となっており、基幹施設を設定すれば、活動再建の治療方針決定に定量的歩行分析などの技術を生生活期でも簡便に適用できる時代が目前に迫っている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、活動再建の達成に必要な治療目標を明確化する AI システムを開発し、リハビリテーション医学における学術的基盤形成に寄与することである。一般に、歩行再建を目指した運動療法は、療法士の臨床経験等に基づいて展開される。片麻痺歩行では、分回しや膝伸展ラスト、足内反などの様々な歩容の異常がみられ、これらを管理するために歩行の要素訓練や装具療法が施されることが多い。しかし、適用した治療が歩行速度や歩行効率、バランス改善に必ずしも結びつくとは限らない。また、異常歩行

の管理に捉われて、活動制限の改善に必要な本質的な治療がおろそかになることも想定される。そこで本研究では、歩行分析指標の中から、歩行による移動能力を高めるために改善すべき運動学的目標を提示することで、運動療法の治療指針を導く AI システムを構築する (図1)。

本研究で用いる AI システムの独創性は2点ある。第一に、品質工学で用いられる「マハラノビスの距離」によって、変数間の相関関係を考慮した健常歩行からのずれを計測する点である。麻痺患者の歩行再建は一般に、健常歩行を基本として、それに近づけるように治療方針が立てられる。片麻痺歩行は、様々な異常パターンが健常歩行との比較において捉えられるため、健



常歩行の基本空間に対する多変量のずれを「マハラノビスの距離」として尺度化する方法が理に
適っている。留意すべきは、「マハラノビスの距離」の値が小さいほど、片麻痺歩行におけ
る活動指標が改善するとは限らず、例えば、片麻痺患者 25 名を対象に実施した予備的研究で
は、健常者とは異なるパターンを治療目標とした方が、歩行速度が速くなる場合が存在した。
活動制限の改善という側面から推奨される歩行様式を抽出できるという点で、歩行再建の治療
法に新たな視点をもたらすことが期待できる。

第二に、高次元多変量の分布から重要度の高い指標をサンプリングするマルコフ連鎖モンテカ
ル口法（以下、MCMC 法）を適応する点にある。機械学習に際して次元削減を行う必要がなく、
あらゆる指標の中から考慮すべき複数の指標が抽出されるので、先入観なくサンプリングが
行われ、思いもかけない指標に注目する必要があることを示唆してくれる。比較的少ないサンプ
ル数でも検証できるので、データベースの類型化を行いながら研究を進めることができるとい
う利点がある。歩行速度のみならず、地域での生活に必要な歩行持久力、転倒予防の観点
からも重要な歩行バランス能力に関して、定量的歩行分析データに基づく治療指針の基盤を
形成する。

3. 研究の方法

(1) 健常者および生活期片麻痺患者のデータベース構築：

健常高齢者について、歩行速度、歩行持久力の指標として 6 分間歩行試験、歩行バランス指
標として天井効果が小さく地域社会での生活機能を反映する Community Balance and Mobility
Scale（以下、CBM）を計測し、マハラノビスの基本空間を構築する。

地域で生活している片麻痺患者は、ある一定の活動レベルに達した集団とみなすことができ
る。より高い活動度にある歩行様式を抽出できるように、就労に至っている片麻痺患者も含めて、
歩行速度、歩行持久力、歩行バランスにリンクした定量的歩行分析のデータベースを構築する。

(2) 重要度サンプリングに基づく歩行再建指針の作成：

歩行速度、歩行持久力、歩行バランスを目的変数として、MCMC 法によって抽出された歩行関連
指標から、歩行再建において有効な治療指針を構築する。健常高齢者についても、健康寿命延伸
の観点から着目する歩行パターンの分析を試みる。片麻痺歩行については、今回の研究の特徴で
ある歩行の持久力とバランス能力の関連を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 健常者および生活期片麻痺患者のデータベース構築：

枚方市シルバー人材センターの協力を得て、
健常高齢者 102 名(男性 64 名、女性 38 名:平均
年齢 71.3 ± 4.9 歳)について、6 分間歩行距離(6
minutes walking distance: 6MWD) ($553.3 \pm$
 98.0 m) および CBM (74.7 ± 11.2 点) とともに
3 次元歩行分析を実施し、データベース化した。

地域で生活している片麻痺患者 50 名(男性
30 名、女性 20 名:平均年齢 66.7 ± 13.7 歳、右片
麻痺 22 名)の 6 分間歩行距離 (6 minutes
walking distance: 6MWD) (248.2 ± 119.0 m) お
よび CBM (28.1 ± 19.8 点) とともに 3 次元歩
行分析を実施し、データベース化した。

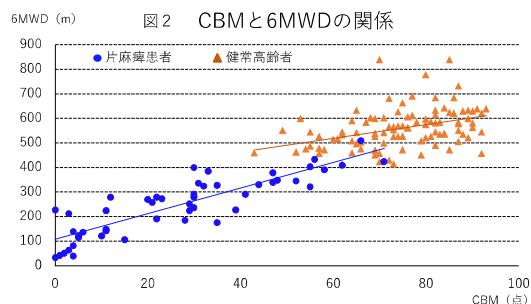
6MWD と CBM の間には、健常高齢者では弱い正の相関 ($r=0.387$)、片麻痺患者では強い正の相
関 ($r=0.869$) を認めた(図 2)。

(2) 重要度サンプリングに基づく歩行再建指針の作成：

MCMC 法による特徴量のサンプリングでは、はじめに抽出された特徴量の組み合わせによって
結果が異なる。当初は 500 試行によって実施していたが、サンプリングされてくる特徴量が 500
試行では収束しない事例を経験し、2,500 試行によって実施することに統一した。

快適歩行速度が 1m/秒未満に低下してきている高齢者では、歩行推進力に関連する床反力後
期成分や立脚後期の足関節底屈モーメントの非対称性が大きいほど 6 分間歩行距離 (6MWD) が長
く、予測とは逆に、機能が保たれている 'strong side' による代償によって、非対称性が大き
いほど歩行持久性は保持された。快適歩行速度が低下してきている高齢者では、床反力垂直成分
第 2 ピーク値の対称性指数と 6MWD には負の相関があり ($r=-0.68$)、非対称性を有する高齢者は
活動量低下リスクを抱える介護予防の重要な標的となる。高齢者の移動能力低下に関連する健
康寿命延伸においては、非対称性という歩容の質的評価に基づいて、推進力低下をきたしている
'weak side' の病態精査に基づくアプローチが必要である(第 60 回日本リハビリテーション
医学会学術集会・最優秀演題賞受賞)。

構築された健常者のデータベースを基にして、予備研究で取得していた片麻痺患者 25 名を
含む 75 名の生活期片麻痺患者の 3 次元歩行分析における特徴分析を、リハビリテーション治療



において重要となる麻痺肢推進力について類型化したところ、つま先離地時の下腿前傾角度の左右差と初期接地時の非麻痺側膝関節伸展角度 ($R^2=0.58$)、初期接地時の非麻痺側膝関節伸展角度と麻痺側膝関節最大屈曲角度と麻痺側足関節最大内反角度 ($R^2=0.62$)、立脚後期の麻痺側下腿前傾角度と麻痺側足関節最大底屈角度と立脚後期の股関節伸展角度の左右差と足関節最大内反角度の左右差 ($R^2=0.68$) で構成された。

活動度の指標として汎用される歩行速度を目的変数とした場合に MCMC 法が抽出した特徴量上位 10 項目 (つま先離地・立脚後期の trailing limb angle、初期接地・荷重応答期の leading limb angle、荷重応答期の床反力制動力の左右の値) について k-means 法によるクラスタリングを実施した (図 3)。さらに各クラスター内において、歩行速度を規定する特徴量を MCMC 法を適用して抽出し、クラスター内で歩行速度を改善するために着目すべき歩行関連特徴量を可視化することで、片麻痺歩行再建における治療アルゴリズムを形成した。

次に、地域社会で重要となる転倒予防ならびに歩行持久力を再建するにあたって考慮すべき問題を捉えるために、片麻痺歩行において強い相関を有する CBM と 6MWD とを規定する歩行関連指標を機械学習によって網羅的に抽出した。両者に単独で最も強く相関する歩行関連指標は、CBM には麻痺肢荷重応答期の制動力 ($r=0.698$)、6MWD には非麻痺肢荷重応答期の制動力 ($r=0.743$) であった。

歩行バランスにおいては、非麻痺肢からの歩行推進力を受けながら麻痺肢に荷重できる能力、歩行持続力においては逆に、麻痺肢からの歩行推進力を受けた非麻痺肢の荷重量が、最も重要な指標となることが示唆された。2~10 項目の歩行関連指標で構成されるマハラノビス空間において、マハラノビス距離との相関が $r > 0.800$ となるのは、CBM は 62、6MWD は 292 サンプルであった。これらを構成する歩行関連指標の抽出頻度を表 1 に示す。CBM と 6MWD の両者に関与する特徴量として、非麻痺肢初期接地時における麻痺肢・非麻痺肢の股関節および膝関節/屈曲伸展角度が抽出されたことから、非麻痺肢初期接地時の矢状面における近位関節位が、歩行パフォーマンスを捉える上での重要なポイントとなることが明らかとなった。

一方、CBM および 6MWD に特異的に関与する歩行関連指標を探索したところ、CBM には初期接地時の床反力左右成分の左右差、6MWD には非麻痺肢初期接地時の麻痺肢 trailing limb angle が抽出された。下肢麻痺機能 (Fugl-Meyer assessment : FMA) が良好で、杖を使わずに歩いている患者では踵接地時の左右動揺が大きく、6MWD が短縮して CBMS が低い例があるのに対し、FMA スコアが低くて杖を用いているが踵接地時の左右動揺が管理され、活動性が拡大することで 6MWD が延長し、バランス機能が高い例があることから、これらにアプローチすることで活動再建を目指した治療を展開できる可能性が示された (第 1 回リハビリテーション医療 Dx 研究会学術集会・優秀演題賞受賞)。

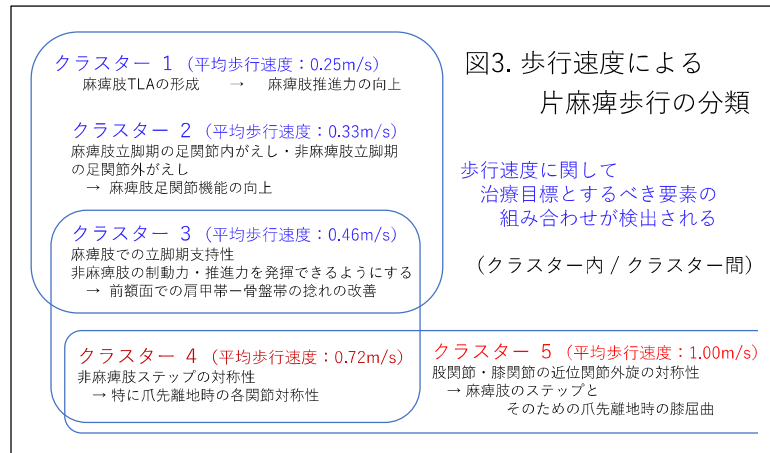


表 1. CBM と 6MWD に関与する歩行関連指標

| sampling rate | CBM | 6MWD |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|
| 非麻痺肢・初期接地 | | |
| 膝関節伸展角度-左右差 | 38.7% | 33.2% |
| 麻痺肢 / 膝関節伸展角度 | 27.4% | 10.0% |
| 非麻痺肢 / 膝関節伸展角度 | 22.6% | 16.4% |
| 股関節屈曲角度-左右差 | 16.0% | 24.0% |
| 非麻痺肢 / 股関節屈曲角度 | 24.20% | 6.0% |
| 非麻痺肢・荷重応答 | | |
| 非麻痺肢 / LLA | 11.0% | 22.30% |
| 初期接地---床反力左右成分-左右差 | 22.60% | — |
| 非麻痺肢初期接地---麻痺肢 / TLA | — | 20.20% |
| 平均相関係数 | CBM : 0.813 (62 samples) | 6MWD : 0.818 (292 samples) |

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0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 島田聡史、間野直人、久保峰鳴、長谷公隆 | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 歩行分析からみたリハビリテーション治療の効果 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Jpn J Rehabil Med | 6. 最初と最後の頁 525-532 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2490/jjrmc.60.525 | 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 長谷公隆、鈴木良和、牛久保智宏 | 4. 巻 278 |
| 2. 論文標題 人工知能システムを用いた歩行分析によるリハビリテーション治療の展開 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Medical Rehabilitation | 6. 最初と最後の頁 28-35 |
| 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 Kimitaka Hase | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Current perspectives on quantitative gait analysis for patients with hemiparesis. | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science | 6. 最初と最後の頁 1-3 |
| 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 10件/うち国際学会 1件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 デジタル・インテグレーションによるリハビリテーション診療の展開 |
| 3. 学会等名 第60回日本リハビリテーション医学会学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 片麻痺患者のバランス能力と歩行耐久性に關与する歩行關連指標の抽出 |
| 3. 学会等名 第1回日本リハビリテーションDX研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 デジタル・インテグレーションによるリハビリテーション診療の展開 |
| 3. 学会等名 第53回日本臨床神経生理学会学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 上下肢痙縮に対するボツリヌス療法 |
| 3. 学会等名 第10回日本ボツリヌス治療学会学術大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kimitaka Hase |
| 2. 発表標題 Rehabilitation of hemiparetic gait based on instrumented gait analysis |
| 3. 学会等名 The 17th annual academic conference of MSPRM（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長谷公隆、間野直人、中條雄太、森公彦 |
| 2. 発表標題 歩行分析に基づいた片麻痺歩行の下肢装具療法 |
| 3. 学会等名 第59回日本リハビリテーション学会学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 課題特異的練習と機械学習を用いた特徴量抽出に基づくリハビリテーション治療 |
| 3. 学会等名 第59回日本リハビリテーション学会学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 歩行分析から見えるリハビリテーション治療の効果 |
| 3. 学会等名 第59回日本リハビリテーション学会学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 リハビリテーションの現在地と未来 |
| 3. 学会等名 第34回大阪府理学療法学術集会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 臨床神経生理学の進歩とリハビリテーション医療デジタルトランスフォーメーション 歩行分析データに基づくリハビリテーション治療 |
| 3. 学会等名 第52回日本臨床神経生理学会学術大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鈴木良和、野瀬彩登美、中田瑞季、竹内翔、勝島詩恵、長谷公隆 |
| 2. 発表標題 脳卒中片麻痺患者における歩行時の前方推進力向上に寄与するTLA構成因子の検討 |
| 3. 学会等名 第58回日本リハビリテーション医学会学術集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 長谷公隆 |
| 2. 発表標題 定量的歩行分析に基づくリハビリテーション治療の展開 |
| 3. 学会等名 第26回日本基礎理学療法学会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|-------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 森公彦、牛久保智宏、長谷公隆 | 4. 発行年 2021年 |
| 2. 出版社 情報機構 | 5. 総ページ数 12 |
| 3. 書名 医療機器・ヘルスケアにおけるICT技術開発と規制対応 | |

〔出願〕 計1件

| | | |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 産業財産権の名称 情報処理装置、有用パラメータ選択方法及びプログラム | 発明者 牛久保智宏、長谷公隆 | 権利者 アニマ株式会社、学校法人関西医科大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、2021-078379 | 出願年 2021年 | 国内・外国の別 国内 |

〔取得〕 計1件

| | | |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 産業財産権の名称 情報処理装置、有用パラメータ選択方法及びプログラム | 発明者 牛久保智宏、長谷公隆 | 権利者 アニマ株式会社、学校法人関西医科大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、7174386 | 取得年 2022年 | 国内・外国の別 国内 |

〔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 | 森 公彦 (MORI Kimihiko) (10890890) | 関西医科大学・リハビリテーション学部・助教 (34417) | |
| 研究分担者 | 脇田 正徳 (WAKIDA Masanori) (70890888) | 関西医科大学・リハビリテーション学部・助教 (34417) | |

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 |
|---------|---------|