

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：82404

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04507

研究課題名（和文）筋骨格モデルを包含したスマート走行センシングによるシニアカーの安全評価基盤の創成

研究課題名（英文）A smart drive monitoring system with the driver's musculo-skeletal model for a motorized mobility scooter to assess and assist safety driving

研究代表者

硯川 潤（Suzurikawa, Jun）

国立障害者リハビリテーションセンター（研究所）・研究所 福祉機器開発部・研究室長

研究者番号：50571577

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、シニアカーの安全走行を支援するためのモニタリングシステム構築を目的として、操作負担定量化のためのシミュレーションモデル開発と、簡易に実装可能な操作状態の計測システムの開発を目的とした。搭乗者の筋骨格モデルとシニアカー車体モデルの連成解析により、操作時の関節トルクを推定する手法を構築した。操作時の筋電位計測結果と比較したところ相関を確認でき、低速走行時のハンドル反力増加による負担増も再現できた。また、シニアカー車体構造の幾何学モデルにもとづいて、慣性センサで計測した重力加速度からハンドル・アクセルレバー操作角度を推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、シニアカーは高齢者の自動車運転免許返納後の近距離移動支援手段として注目されている。一方で、法的には歩行者の扱いとなり、操作訓練や技能習得に関する規則が存在しないため、安全走行のための技術的な支援策が求められている。本研究で提案した操作負担シミュレーションモデルや操作状態推定手法は、このような安全促進に資する基盤的技術として、シニアカー利用現場で活用できる。特に、ユーザの操作行動を定量化できれば、客観的な技能評価指標として、従来の技能評価・訓練介入手法を大きく改善できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a smart drive monitoring system for a motorized mobility scooter (MMS) to assess and assist safety driving. To achieve this objective, we proposed and developed a simulation model that can estimate the burden of driving MMS and an estimation method of the angles of the steering wheel and throttle lever of MMS. The coupled analysis of the musculo-skeletal model of the upper body and the mechanical model of the MMS structure successfully estimated the joint torques in the shoulder and elbow. The estimated torque values were experimentally proven to be associated with the integrated electromyographic signals recorded at the relating muscles in the upper limbs. For quantification of MMS operation during driving, we proposed a novel estimation method of the interface operating angles of MMS using inertial measurement units. The evaluation experiments of the proposed method confirmed its practicable accuracy and robustness against the terrain inclination.

研究分野：福祉工学

キーワード：電動車椅子 技能評価 ライフログ 慣性センサ 移動支援機器

1. 研究開始当初の背景

近年、介護保険制度下での電動車椅子利用が進み、その安全性の確保が社会的な問題となっている。ジョイスティック形電動車椅子と異なり、シニアカーの前輪用ハンドルは車軸に直結されているため（パワステのない自動車と同じ）、電子制御によるアシストなどが難しい。また、ハンドル側面のアクセルレバー操作には指先に高い巧緻性が求められるため、斜面・振動などが姿勢保持に与える影響も懸念される。一方で、シニアカーの多くはレンタルで利用されるため、コストの制約が大きい反面、車体寿命は長く、新たな機構・構造を導入した車体が普及しにくい。従って、新たな安全機能を実用化するためには、コストや人的リソースなどの現場での制約を十分に加味する必要がある。また、現在流通している車体にも後付けで簡単に実装できるようなシステム構成であることが望ましい。

電動車椅子の安全技術の一つに、IoT (Internet of Things) 技術を応用した走行動態のモニタリングがある。日々の走行データから危険走行等を抽出できれば、安全な操作の指導につながれる可能性がある。また、センサとプロセッサをパッケージ化するスマートセンシング技術を用いれば、走行データを車体側で解釈・縮約して安価な低容量通信回線で送信できる。これにより運用コストも抑えられ、レンタル利用されるシニアカーにも無理なく導入できる。しかし、シニアカーに導入するためには、以下の問題を解決する必要がある。

i) ハンドル・アクセルの操作性や、着座姿勢において斜面・振動などが姿勢保持に与える影響など、車体と身体との相互作用を推定・評価する手法が確立されていない。
ii) センシングシステムの構成が複雑であり、実生活環境での運用が難しい。機械に不慣れなシニアカー利用者やその介護者・支援者を想定し、車体への取り付け、システムの起動・終了、バッテリー充電などの操作手順を簡略化する必要がある。

申請者らはこれまでに、ジョイスティック形やハンドル形電動車椅子に後付けで実装可能な操作ログ収集システムを開発してきた。車体挙動と操作ログを合わせて分析することで、走行時の不安定な車体挙動を環境・操作者起因いずれかに分別できる可能性が示唆された。また、移動機器と相互作用する骨格・筋肉が受ける負荷を定量化するために、筋骨格モデルを用いた逆動力学計算の活用手法も提案してきた。これらの知見を組み合わせることで、身体への負荷を考慮した走行評価手法を構築できる可能性がある。

しかし、生体内負荷を筋骨格モデルから逆動力学的に計算するためには、ハンドル・着座面など全ての接触部に作用する力を計測する必要がある。実用性を充たすためには、車体に力覚センサを搭載することは現実的ではなく、何らかの推定方法を考案する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、筋骨格モデルを包含したシニアカーのスマート走行センシングシステムを開発する。それにより、身体への操作負担を含めた走行・操作動態の定量的評価にもとづいて、適切な操作へ誘導する安全評価基盤を創成したい。そのために以下の目標を達成する。

(1) シニアカー操作者の筋骨格モデルによる身体的負担の定量化手法の開発 シニアカーに搭乗する人体の筋骨格モデルを構築し、操作時に身体内部に発生する力学的負荷を推定することで、身体への負担を定量化する手法を開発する。
(2) シニアカーの利用環境で活用可能な簡易な走行モニタリングシステムの開発 簡易な構成で、車体本体内部、特に電気回路や制御システムの改造を必要としない、後付け可能な操作状態の計測システムを開発する。

3. 研究の方法

(1) シニアカー操作者の筋骨格モデルによる身体的負担の定量化手法の開発 シミュレーションのためのモデルとして、シニアカー搭乗者の筋骨格モデルとシニアカー車体モデルそれぞれを構築した。筋骨格モデルの運動生成には準静的動作を仮定し、PD 制御を用いて身体モデルの各関節角度が目標角度に近づくような関節トルクを発生する方法を採用した。モデルの妥当性は、シニアカー実機を用いた走行実験により、筋電位や操作ログの測定から推定した被験者の負担と、シミュレーション結果を照合して評価した。

(2) シニアカーの利用環境で活用可能な簡易な走行モニタリングシステムの開発 慣性センサで計測する重力加速度からアクセルレバー・ハンドル角度を推定するために、両インターフェースの構造を反映した幾何学モデルを構築した。また、慣性センサを用いる手法では、車体傾斜補正のために2個のセンサを用いる必要があることから、より実装が簡単な手法として、路面動画像から車体速度を推定し、操作角度に変換する手法も構築した。

4. 研究成果

(1) シニアカー操作者の筋骨格モデルによる身体的負担の定量化手法の開発

図1に示したように、シニアカーの操作負担推定のためのモデルとして、一般的なシニアカー

車体のモデルとそのメインユーザの体格に合わせた身体モデルによる連成モデルを構築した。筋骨格モデルでは、上肢の上腕部、前腕部、手、指に加え、体幹の胸部、頭部、腰椎部、骨盤部を剛体リンクで再現した。シニアカーモデルでは、ハンドル操作量・走行速度・車体構造にもとづいて反力を計算した。

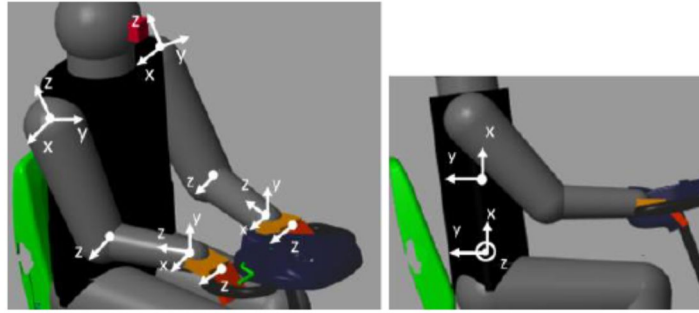


図1 構築したモデル。

また、この連成モデルを用いてシニアカーの運転操作中の姿勢を再現するシミュレーションモデルを作成した。特に、剛体同士の接触が考慮されないソフトウェア上でも接触やすべりの関係を現実に近い形で再現する方法を考案した。また、シニアカー運転操作中の姿勢変化による負荷を最小にする最適化計算において、ハンドルとアクセルレバーの回転角度の制約のように計算上の制約条件に加えることが困難である場合の解決策として、評価関数に制約項として加えることで最適化の条件として扱う手法を提案した。運転動作の最適化には、遺伝的アルゴリズムを使用した。シミュレーション上の身体モデルがPD制御でハンドルとアクセルレバーを操作し、目標操作量を満たす動作を行うことを制約条件としており、その際の身体モデルの各関節トルクの二乗和の最小を遺伝的アルゴリズムで算出した。

構築したモデルの妥当性評価では、左右三角筋の前部、中部、後部、上腕二頭筋の計8カ所で、筋電位を計測した。それと同期させて、本研究で開発した慣性センサによる操作量推定手法を用いて、走行中のアクセルレバー・ハンドル操作角度をそれぞれ計測した。構築したシミュレーションの関節トルクと筋電位計測結果を比較したところ、腕の引手・押手ごとの付加集中部位の特徴に相関傾向が見られた。また、走行速度に依存した傾向差についても、シミュレーション・計測結果いずれにおいても、低速度下でハンドル反力が增大することによる負担増が観察された。以上より、構築したモデルの妥当性を確認できたと考える。

構築したモデルの妥当性評価では、左右三角筋の前部、中部、後部、上腕二頭筋の計8カ所で、筋電位を計測した。それと同期させて、本研究で開発した慣性センサによる操作量推定手法を用いて、走行中のアクセルレバー・ハンドル操作角度をそれぞれ計測した。構築したシミュレーションの関節トルクと筋電位計測結果を比較したところ、腕の引手・押手ごとの付加集中部位の特徴に相関傾向が見られた。また、走行速度に依存した傾向差についても、シミュレーション・計測結果いずれにおいても、低速度下でハンドル反力が增大することによる負担増が観察された。以上より、構築したモデルの妥当性を確認できたと考える。

(2) シニアカーの利用環境で活用可能な簡易な走行モニタリングシステムの開発

図2に本研究で提案した、慣性センサを用いた操作角度推定手法のための幾何学モデルの概要を示す。車体からハンドルパネルに取り付けられたアクセルレバーに至るまでの座標系の回転を、回転行列でモデル化した。その結果、ハンドル・アクセルレバー角度は、以下のように推定できる。

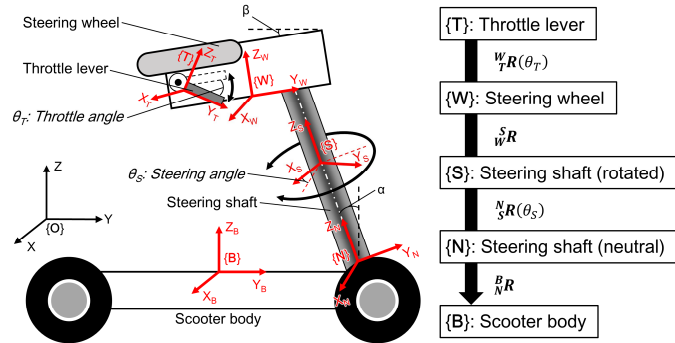


図2 シニアカー車体の幾何学モデル。

$$\theta_S = \sin^{-1} \left(\frac{T a_x}{\sqrt{B a_x^2 + C_1^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B a_x}{C_1} \right) \quad (1)$$

$$C_1 = B a_y \cos \alpha + B a_z \sin \alpha$$

$$\theta_T = \tan^{-1} \left(\frac{K_2}{K_1} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{T a_y}{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}} \right) - (\alpha - \beta) \quad (2)$$

$$K_1 = -B a_y \sin \alpha + B a_z \cos \alpha$$

$$K_2 = -B a_x \sin \theta_S + B a_y \cos \theta_S \cos \alpha + B a_z \cos \theta_S \sin \alpha$$

ここで $T a$ と $B a$ は、それぞれアクセルレバーおよび車体に設置された慣性センサの加速度計測値である。

以上のようにして構築した操作角度推定手法の精度を、実際に慣性センサを設置したシ

ニアカーを用いて検証した。図3に示した通り、平地走行時にはレバーに設置した慣性センサのみでも高精度に操作角度を推定できたが、傾斜面の走行時には誤差が顕著になり、車体センサの補正が有用であることがわかった。一方で、慣性センサの角速度を用いると、車体センサのみでもハンドル角度については高い精度で推定でき、5度の傾斜面においてもその平均誤差は1度以下に抑えられた。

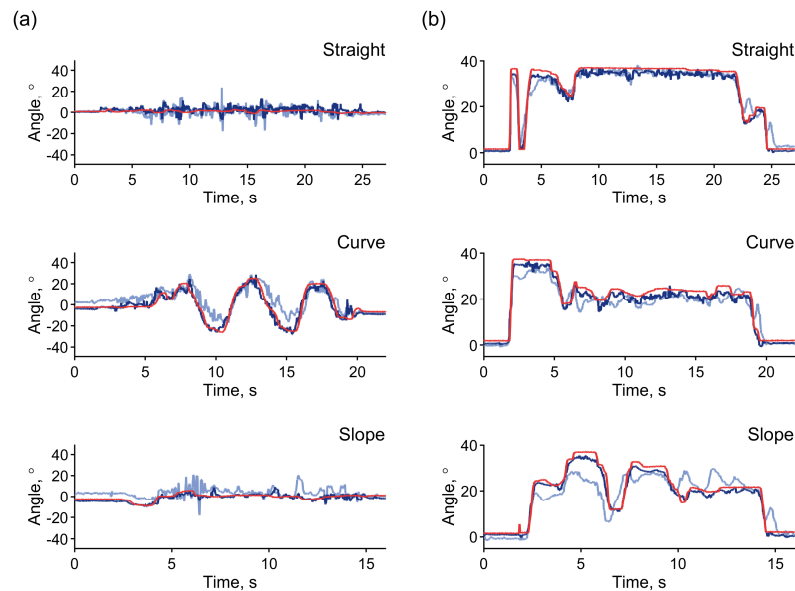


図3 操作角度推定結果。(a)ハンドル角度。(b)アクセルレバー角度。

真値：赤，慣性センサ（補正無）：水色，慣性センサ（補正有）：青。

振動など路面状況に影響を受けにくい操作推定手法として、動画の visual odometry を用いることで、シニアカー車体後部に設置した単眼カメラで取得した動画から、ハンドル・アクセル操作を推定することを試みた。走行路面の特徴点を抽出し、そのフレーム間差分から前後左右方向の速度をそれぞれ算出した。変換式を介することで、速度は操作角度に変換できる。同時計測した慣性センサを用いた操作角度推定結果と比較すると、実用上十分な精度を確認できた。

<引用文献>

Rabreau, O.; Chevallier, S.; Chassagne, L.; Monacelli, E. SenseJoy, a pluggable solution for assessing user behavior during powered wheelchair driving tasks. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2019, 16, 10-12.

横山夏樹，長谷和徳，硯川潤，辻本孝則，新井健太，“ハンドル型電動車椅子の操作負担推定のためのモデル構築”，LIFE2020-2021 講演論文集，pp.210-213，2021.

Suzurikawa, J.; Kurokawa, S.; Sugiyama, H.; Hase, K. Estimation of Steering and Throttle Angles of a Motorized Mobility Scooter with Inertial Measurement Units for Continuous Quantification of Driving Operation. *Sensors* 2022, 22.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1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 硯川潤	4. 巻 38
2. 論文標題 実用的な福祉機器開発のために必要なこと	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 123-126
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 硯川潤, 近藤知子	4. 巻 245
2. 論文標題 車椅子処方における思考過程—模擬判定調査が示す診立ての構造—	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MB Med. Reha.	6. 最初と最後の頁 1-7
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 Suzurikawa Jun, Kurokawa Shunsuke, Sugiyama Haruki, Hase Kazunori	4. 巻 22
2. 論文標題 Estimation of Steering and Throttle Angles of a Motorized Mobility Scooter with Inertial Measurement Units for Continuous Quantification of Driving Operation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3161 ~ 3161
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22093161	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 硯川潤	4. 巻 49
2. 論文標題 特集 社会参加の手段としての車椅子と関連用具 車載のための用具	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 総合リハビリテーション	6. 最初と最後の頁 751 ~ 756
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11477/mf.1552202284	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kurokawa S, Suzurikawa J, Inoue T, Hase K
2. 発表標題 Accuracy evaluation of an add-on acquisition system of operation log with inertial measurement units for a mobility scooter
3. 学会等名 AAATE2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山夏樹, 硯川潤, 長谷和徳
2. 発表標題 ハンドル型電動車椅子の操作負担推定のためのモデル構築
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第26期総会・講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川竣介, 硯川潤, 長谷和徳
2. 発表標題 操舵角への制御介入を実装したハンドル型電動車椅子操作者の応答解析
3. 学会等名 第40回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山夏樹, 長谷和徳, 硯川潤, 辻本孝則, 新井健太
2. 発表標題 ハンドル型電動車椅子の操作負担推定のためのモデル構築
3. 学会等名 LIFE2020-2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉山悠生, 硯川潤, 長谷和徳
2. 発表標題 慣性センサを用いたハンドル型電動車椅子の操作ログ推定システムの開発
3. 学会等名 LIFE2020-2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 硯川 潤, 原田祐輔, 門馬博, 近藤知子, 澤田有希, 竹嶋理恵
2. 発表標題 操作入力情報を用いたハンドル型電動車椅子の定量的な安全評価指標の構築
3. 学会等名 第35回リハ工学カンファレンス
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	長谷 和徳 (Hase Kazunori) (10357775)	東京都立大学・システムデザイン研究科・教授 (22604)	
研究 分担者	近藤 知子 (Kondo Tomoko) (90274084)	杏林大学・保健学部・教授 (32610)	

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