

(1) 研究題目

※スペースが足りない場合は、枠を追加いただいて構いません。

車椅子介助負担軽減のためのインピーダンスマッチングを用いた可変剛性ハンドルの開発

(2) 本研究の期間

(西暦) 2024年4月 ～ 2025年3月

(3) 本研究の成果と今後の課題

本研究の成果概要

現在日本では 65 歳以上の高齢者人口が増加しており、それに伴い、車椅子介助を行う機会も増加すると考えられる。しかし、車椅子移送介助は身体的負担が大きく、介助者の負担を軽減することが喫緊の課題となっている。車椅子介助者の負担に関して、介助者は特に上肢に大きな負担を感じると報告されている。上肢には車椅子を押す力の反力が作用しており、それが上肢負担の要因である可能性が考えられる。そのため、研究代表者は、車椅子を押す力に着目して負担の評価を行っている。負担は長時間の操作でも増加すると考えられるため、単に押す力の大きさだけでなく、時間も考慮した押す力の総量（積分値）を用いて評価する必要がある。車椅子の操作では、車椅子を前進させる際に必要な押す動作だけでなく、後退させる際に行う引く動作の両方を用いて、車椅子の速度を調整しているため、押す力だけでなく、引く力も負担の対象とし、車椅子を操作する矢状面方向の力（以降、押付力と呼ぶ）の絶対値を時間で積分した値を負担の評価指標としている。しかし、この押付力を効果的に低減する手法は明らかになっていない。

そこで、本研究では、車椅子操作における押付力の効果的な低減手法として、押付け力が小さいとされる介助熟練者の操作特性の抽出とそれに基づく操作支援を行う。具体的には、介助者の上肢の機械インピーダンスに基づくハンドルを製作する。本報告書では、介助者の上肢の機械インピーダンスを推定する際に用いる介助者の上肢の姿勢推定の成果について、まず記載する。次に、介助者の上肢の機械インピーダンスを調整する機構として、車椅子のハンドルにバネを内蔵することで、介助者のみかけの剛性を小さくする手法を構築する。しかし、このバネハンドルは発進などの加速走行時には、押付力の低減効果が有効に働かない可能性がある。加速走行時はその加速のために大きな力を要する。そのため、バネハンドルを用いた場合には初めにバネを大きく収縮させる。このとき、手先は動くのに対して車椅子は動かない。そして、ある程度バネが収縮したところで、車椅子は加速を開始する。つまり、加速のためにバネを大きく収縮させると、手先の運動と車椅子の動作に遅れが発生する。この遅れにより、1. 介助者は想定よりも車椅子が動かないと感じるため、さらに大きい押付力を発揮する。2. 車椅子の速度調整が難しくなるため、定常速度に至るまでの時間が大きくなる。これらのことから、手先の運動と車椅子の動作の遅れは押付力の積分値を増大させる可能性がある。従って、押付力の積分値低減のためには、加速区間ではバネ定数を大きくし、定常速度区間ではバネ定数を小さくするようなハンドルが望ましいといえる。そのため、本研究では、加速区間・定常速度区間の段階に応じてバネ定数を変化させ、押付力の積分値をさらに低減させる可変剛性ハンドルの開発を行い、その有効性の評価について説明する。

成果 A. ハンドルの把持圧分布に基づく介助者の姿勢推定[関連業績 1, 2, 7]

上肢のインピーダンスを推定するには、上肢の姿勢情報と押付力を取得する必要がある。その中で上肢の姿勢情報はモーションキャプチャシステム（図 1）などで取得する手法が挙げられるが、この方法ではカメラを設置した限られた空間でしか測定できず、実用的に車椅子を使用する場面での各関節角度の測定は困難である。そこで本研究では、介助者が車椅子のハンドルを把持する圧力分布から、上肢の各関節角度の推定を行った。把持圧力分布から姿勢情報を取得しインピーダンスを推定することが可能であれば、カメラによる測定のように使用する環境を制限することなく、通常の操作の中で測定が可能である。介助者が車椅子のハンドルを把持する圧力分布は、ハンドルのグリップに取り付けた面圧センサ（EWS 製、ハンドル用面圧センサ）により計測した（図 2）。この面圧センサには、直径 10mm のセンサセルが 64 点配置されており、センサセルごとに荷重を測定することができる。各センサセルのサンプリング周期は 20~22ms であり、ばらつきが見られたので、得られたデータを線形補間により 20ms にリサンプリングした。

車椅子操作を行う実験参加者は若年健常者（年齢 22 歳、身長 170cm、体重 60kg の男性 1 名）とし、車椅子搭乗者は若年健常者（年齢 22 歳、身長 165cm、体重 65kg の男性 1 名）とした。車椅子操作者には、把持圧力分布と各関節角度の対応が見られる操作として、その場から動かずに車椅子を大きく押し引きする動作を一定周期で繰り返し行うよう指示した。その際、操作中に車椅子のハンドルを握る位置を変えないことを注意した。実験は 2 試行実施し、この動作における把持圧力分布と車椅子操作者の各関節角度を計測した。取得した圧力分布情報から関節角度を推定するが、そのときの学習用データと検証用データは、同一試行のデータを使用した。これは、学習用データと検証用データをそれぞれ別の試行から取得すると、各試行によってハンドルの握り方が変わることに伴い、学習内容が正しく反映されない可能性があるためである。計測時間は 30 s とし、最初の 25 s を推定のための学習データ、残りの 5 s を検証データとした。

取得した把持圧力分布のデータから上肢の各関節角度を推定する手法として、把持圧力と各関節角度の変化には線形関係が確認されたため、線形回帰モデルを適用した。ここで多変量線形回帰モデルを用いたのは比較的単純で計算量が少なく、高速に計算が実行可能であるためである。推定の前には、変数選択を行った。これはすべての圧力情報を変数として利用すると、不要な変数が含まれノイズが増加したり過学習が起こったりして、推定精度が低下する可能性があるためである。変数選択は、具体的には Filter 法の単変量特徴量選択を行い、関節角度との相関係数が 0.15 未満の変数を除外した。その後、圧力分布情報と関節角度を標準化し、多変量線形回帰モデルを構築した。各関節角度の推定結果を確認したところ、決定係数が 0.8 を超える精度で推定を実現できていることがわかった（図 3）。今後は、精度の高い推定結果を再現性良く得るため、面圧センサの感度調整や、適切な重みづけが行える手法の検討を行う。

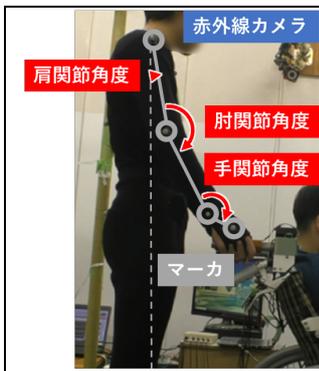


図 1 モーションキャプチャによる姿勢計測



図 2 ハンドル把持時の圧力分布を計測するグリップ

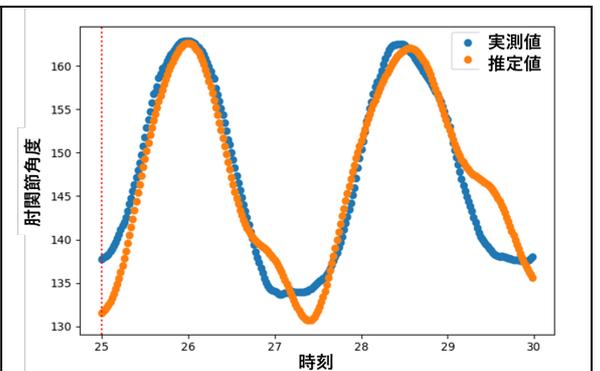


図 3 肘関節角度の推定結果

成果 B. 適切なインピーダンスを付与する可変剛性ハンドルの開発 [関連業績 3-6]

可変剛性ハンドルに要求されることとして、「小型で簡便な構造であること」「粘性の要素を含まないこと」が挙げられる。本研究では車椅子の構造自体を大きく変えることなく、市販の車椅子に取り付け可能な機構により、押付力の積分値を低減させる手法を目指している。そのため、車椅子に取り付ける場合、その機構は複雑なものではなく、車椅子操作を阻害しない大きさである必要がある。また、加速走行時の問題として、手先の運動と車椅子の動作に遅れが発生する点がある。ここでハンドルの機構に粘性の要素が加わると、その粘性により遅れがさらに増大する可能性が考えられる。よって、ここでは剛性の要素のみを持つバネを用いて介助者の上肢の機械インピーダンスを調整する手法を提案する。

バネを用いて剛性を変化させる方法として、バネの予荷重・予張力を調整する機構や、バネと荷重の伝達比を変更する機構、バネの物理的性質を変更する機構などが挙げられる。バネの予荷重・予張力を調整する機構やバネと荷重の伝達比を変更する機構は、回転方向の変位に対して剛性を可変にする機構であり、車椅子に適応するには変位の方向を回転方向から直動方向に変換する必要がある。従って、その変換のために構造が大型化するため、車椅子に取り付けることが困難となる可能性がある。一方でバネの物理的性質を変更する機構は、バネの有効巻き数を変更するなどの比較的簡便な機構であり、小型化して車椅子のハンドルに応用できる可能性がある。よって、本研究では、車椅子へ取り付けることが可能な小型で簡易的な構造として、バネの有効巻き数を調整しバネ定数を変更する可変剛性機構を提案する。

本研究では、車椅子へ取り付けることが可能な小型で簡易的な構造として、バネの有効巻き数を調整しバネ定数を変更する可変剛性機構を採用した。図 4 に示すように、可変剛性ハンドルは主にハンドル軸、モータ、回転棒、コイルバネ、グリップで構成される。ハンドル軸は車椅子に固定した力覚センサに接続され、モータと回転棒、バネが搭載されている。グリップは中空になっており、介助者が力を加えるとバネを押し

縮めてハンドル軸上を移動する機構となっている。図4に示すように、バネはらせん状の溝を切った回転棒に接続される。このとき、バネの2巻き程度が接続のために使われるため、可変剛性ハンドルで実現し得るバネ定数の範囲は小さくなる。バネに加わった力が回転棒に伝えられる際、回転棒に巻き取られた部分には力が伝達されず、バネとして働くのは回転棒に巻き取られていない部分となる。モータによって回転棒を回転させ、バネの巻き取り量を変化させることでバネの有効巻き数を調整し、任意のバネ定数を実現する。

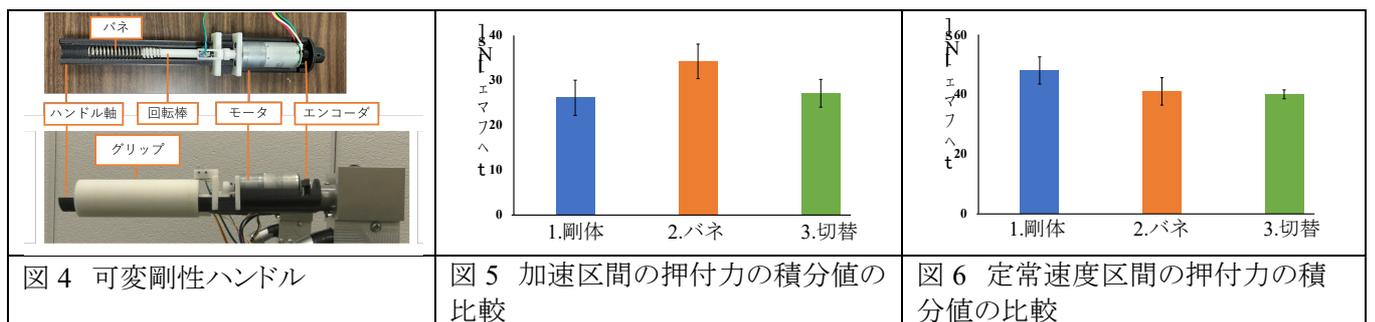
成果 C. 可変剛性ハンドルの有効性評価[関連業績 3-6]

可変剛性ハンドルの有効性を評価する実験として、路面の状態によって車椅子操作に影響を与えない屋内で実施し、長時間連続して計測を行うため、トレッドミル（ベルテック社、ダブルベルトトレッドミル ITR5018-11）を用いた。本実験では、介助者が自由な加速度で車椅子操作を行う必要があったため、研究代表者によって開発している自由歩行トレッドミルを使用している。これは、介助者の腰部に取り付けたワイヤの牽引量をエンコーダより検出し、その値に基づきトレッドミルの速度を制御している。さらに、試行ごとの定常速度を統一するために、初期位置と定常走行時の操作位置にレーザを照射した。しかし、照射したレーザに注視して車椅子操作を行うと、視線が低下し、頭部の姿勢が変化することで実際の操作と異なってしまいう可能性がある。そこで、実験参加者の頭上にビデオカメラを設置し、その映像を実験参加者前方に配置したモニタにリアルタイムで投影した。これにより、実験参加者の視線を前方に向けることができ、レーザで指示した位置で車椅子操作を行うことが可能である。また、実験参加者の手先と車椅子の動作を計測するために、モーションキャプチャシステム（OptitrackJapan 社製、Optitrack™）を用いた。実験参加者の手先および車椅子に赤外線反射マークを取り付け、そのマーク位置を7台の赤外線カメラにより計測を行った。実験は、市販の車椅子（幸和製作所社製、ハンドルブレーキ付きアルミ車いす B-31）に可変剛性ハンドルを取り付けて行った。ハンドルの根元には6軸力覚センサ（テック技販社製、USX10-H10-500N）が固定されており、ハンドルに加わる押付力を計測することができる。力覚センサのサンプリング周波数は1000Hzである。

車椅子操作を行う実験参加者は若年健常者（年齢 22 歳、身長 165cm、体重 65kg の男性 1 名）とし、車椅子搭乗者は若年健常者（年齢 23 歳、身長 181cm、体重 77kg の男性 1 名）とした。実験はトレッドミル上で行い、車椅子が静止した状態から発進し、定常速度で走行するまでの操作を測定し、計測時間は 30 秒とした。車椅子の初期位置と定常速度での操作位置は照射したレーザに合わせるよう指示した。実験は次の3つの条件（1:剛体、2:バネ定数 0.58N/mm、3:加速区間は剛体、定常速度区間はバネ定数 0.58N/mm に切替）とし、それぞれ5試行ずつ行った。本実験で行うバネ定数の条件は、可変剛性ハンドルが取り得る最小の値とした。これは、バネが押付力の積分値に与える影響を大きくし、剛体と比較することで検証するためである。

図5、6に、条件1~3における加速区間と定常速度区間の押付力の積分値を示す。図5を見ると、加速区間では、条件3の押付力の積分値がバネを作用させた条件2の押付力の積分値に対して小さくなっている。また、図6を見ると、定常速度区間では、条件3の押付力の積分値は剛体の条件1の押付力の積分値より小さくなっている。以上のことから、可変剛性ハンドルにより区間に応じてバネ定数を変化させることで、全体として押付力の積分値を低減することが確認された。

本研究では、加速・定常速度の区間に応じてバネ定数を切り替えることにより、押付力の積分値を低減させる可変剛性ハンドルの開発を行った。実験では、可変剛性ハンドルを用いることで加速区間では押付力の積分値の増大を防ぎ、定常速度区間ではバネにより押付力の積分値が低減されることが確認された。また、加速区間において剛体の条件とバネを作用させた条件で比較を行った結果から、バネの収縮による手先と車椅子の運動の遅れによって、押付力の積分値を増大させる可能性が示唆された。今後は、グリップを握る強さなどの車椅子操作中の動作から自動的に加速・定速走行を検知してバネ定数の切り替えを行うことを目標とする。



関連業績

学会発表 4 件

1. 小嶋純奈, 久保大地, 松永夏己, 小林洋, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 車椅子操作における表面に突起を施したハンドルを用いた把持圧力分布による上肢姿勢推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2025) , 2A1-A02, 山形ビックウイング・やまぎん県民ホール (山形) , Jun. 4- Jun. 7, 2025.
2. 久保大地, 西山悠太, 松永夏己, 小林洋, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 車椅子介助におけるハンドル把持圧力分布に基づいた上肢姿勢推定, 第 25 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI 2024) , pp. 2778-2781, アイーナいわて県民情報交流センター (岩手) , Dec. 18-20, 2024.
3. 西山悠太, 松永夏己, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 介助者の車椅子を押す力を低減させるデバイス開発に向けた車椅子操作力学特性の解析, 第 25 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI 2024) , pp. 3040-3043, アイーナいわて県民情報交流センター (岩手) , Dec. 18-20, 2024.
4. 久保大地, 西山悠太, 松永夏己, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 車椅子介助者の負担を軽減させる可変剛性ハンドルの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2024) , 2A1-J09, ライトキューブ宇都宮 (栃木) , May 29- Jun. 1, 2024.

招待講演 2 件

5. 久保大地, 西山悠太, 松永夏己, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 車椅子介助者の負担を軽減させる可変剛性ハンドルの開発, UDX ワークショップ 2025, オンライン開催, Feb. 17, 2025.
6. 西山悠太, 松永夏己, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 介助者の車椅子を押す力を低減させるデバイス開発に向けた車椅子操作力学特性の解析, UDX ワークショップ 2025, オンライン開催, Feb. 17, 2025.

受賞 1 件

7. 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2024 優秀講演賞, (久保大地, 西山悠太, 松永夏己, 小林洋, 金田礼人, 山本元司, **中島康貴**, 車椅子介助におけるハンドル把持圧力分布に基づいた上肢姿勢推定, 第 25 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI 2024) , pp. 2778-2781, アイーナいわて県民情報交流センター (岩手) , Dec. 18-20, 2024.) , 2025 年 2 月 17 日.

謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なるご支援を頂いた公益財団法人カインズデジタルイノベーション財団に深く感謝の意を表す。