

[研究助成 (A)]

車椅子介助者のインピーダンス推定と付与を両立した
小型可変剛性ハンドルの開発

A Variable Stiffness Handle with Impedance Estimation and Assistance to Wheelchair Caregivers

2231020



研究代表者

九州大学 大学院工学研究院

准教授

中 島 康 貴

[研究の目的]

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^{[1][2]}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^[3]。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値に注目し、押付力が小さい介助熟練者と押付力が大きい介助初心者の機械インピーダンスを比較し、そ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、押付力が小さい介助熟練者と比べて、押付力が大きい介助初心者では剛性が小さかった特徴に基づき^[A]、上肢の剛性を小さくするバネハンドルの成果を報告する^[B]。バネハンドルは、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ことが可能である。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ずるため、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、その成果について説明する^[C]。

〔研究の内容、成果〕

I. ハンドルの把持圧分布に基づく介助者の姿勢推定

上肢の機械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。研究代表者の先行研究^[3]では上肢の姿勢情報をモーションキャプチャシステムにより取得しているが、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(図1)。

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ของการ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



図1 モーションキャプチャによる姿勢計測



図2 ハンドルの把持圧計測用グリップ

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。また、推定のため、得られたデータに対して標準化を行った。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。線形回帰モデル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。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確認された(結果の代表例として肘関節角度の推定結果を図3に示す)。

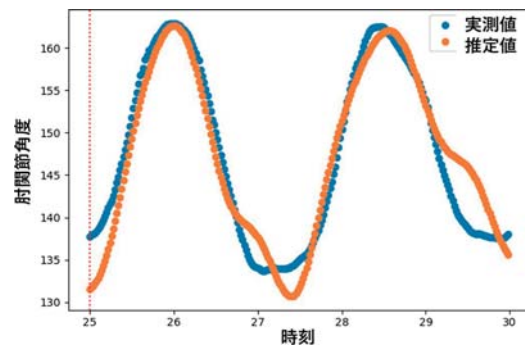


図3 肘関節角度の推定結果

II. 可変剛性ハンドルの開発^[C]

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^[4]として、バネの予荷重・予張力を調整する機構^[5]や、バネと荷重の伝達比を変更する機構^[6]、バネの物理的性質を変更する機構^[7]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应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、



図4 可変剛性ハンドル

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。

Ⅲ. 可変剛性ハンドルの評価^[C]

実験は、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^[8]。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、OptitrackTM）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カを取り付け、そのマーカ位置を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 1000 Hz 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 165 cm，体重 65 kg 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 181 cm，体重 77 kg 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 0.58 N/mm，3. 加速区間は剛体，定常速度区間はバネ定数 0.58 N/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

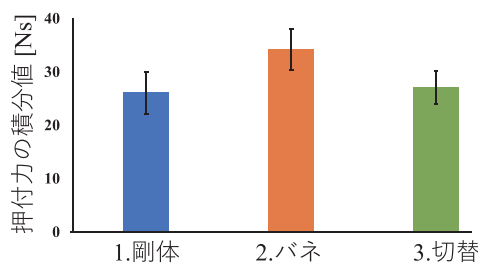


図 5 加速区間の押付力の積分値の比較

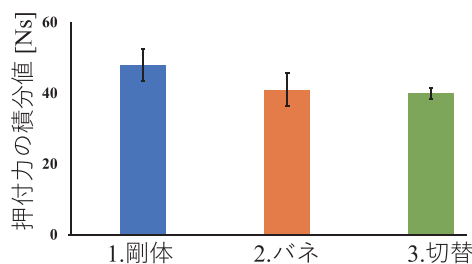


図 6 定常速度区間の押付力の積分値の比較

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。

[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立石科学技術振興財団に深く感謝の意を表する。

[参考文献]

- [1] 能登裕子，齋藤誠二，村木里志．介助による車いす推進速度が乗り心地および介助負担に及ぼす影響．日本看護技術学会誌，Vol. 8，No. 2，pp. 37-45，2009.
- [2] 能登裕子，村木里志．乗車者および介助者を考慮したスローブ勾配と車いす昇降介助操作方法に関する検討．日本看護技術学会誌，Vol. 9，No. 2，pp. 55-66，2010.
- [3] Hiroyuki Kadomatsu, Suguru Sudo, Yasutaka Nakashima, and Motoji Yamamoto. Physical burden on caregivers pushing wheelchairs. In 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 401-405, 2019.
- [4] B. Vanderborght, A. Albu-Schaeffer, A. Bicchi,

- E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. Ganesh, M. Garabini, M. Grebenstein, G. Grioli, S. Haddadin, H. Hoppner, A. Jafari, M. Laffranchi, D. Lefeber, F. Petit, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, M. Van Damme, R. Van Ham, L. C. Visser, and S. Wolf. Variable impedance actuators, A review. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 12, pp. 1601–1614, 2013.
- [5] C. E. English and D. Russell, Mechanics and stiffness limitations of a variable stiffness actuator for use in prosthetic limbs. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 34, No. 1, No. 7–25, 1999.
- [6] Amir Jafari, Nikos G. Tsagarakis, and Darwin G. Caldwell. Awas-ii, A new actuator with adjustable stiffness based on the novel principle of adaptable pivot point and variable lever ratio. In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4638–4643, 2011.
- [7] 尾田十八, 王安麟, 松本徳之. 剛性可変ばねの試作とその変位制御問題への応用, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 59, No. 564, No. 2526–2531, 1993.
- [8] Yasutaka Nakashima, Hiroki Noutsuka, Takanori Fukui, and Motoji Yamamoto. Split-belt controllable treadmill with differential velocity-based fall stimulation and motion analysis. In 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 3354–3357, 2016.

[成果の発表, 論文など]

国内学会発表 4 件

- [A] 西山悠太, 實松建吾, 松永夏己, 本田功輝, 金田礼人, 山本元司, 中島康貴, 車椅子操作における介助者の上肢インピーダンス特性の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2023), 2P2-B06, 名古屋国際会議場 (愛知), Jun. 28–Jul. 1, 2023.
- [B] 西山悠太, 松永夏己, 金田礼人, 本田功輝, 山本元司, 中島康貴, 介助者の上肢インピーダンス推定に基づく車椅子を押す力を低減させるバネハンドルの開発, 第 41 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 2023), 1A4-01, 仙台国際センター (宮城), Sep. 11–14, 2023.
- [C] 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), 2P2-B06, ライトキューブ宇都宮 (栃木), May 29–Jun. 1, 2024.
- [D] 西山悠太, 實松建吾, 松永夏己, 本田功輝, 金田礼人, 山本元司, 中島康貴, 車椅子操作における介助者の上肢インピーダンス特性の解析, UDX ワークショップ 2024, オンライン開催, Feb. 19, 2024.

表彰 1 件

- [E] 2024 年度 UDX 賞, (西山悠太, 實松建吾, 松永夏己, 本田功輝, 金田礼人, 山本元司, 中島康貴, 車椅子操作における介助者の上肢インピーダンス特性の解析, UDX ワークショップ 2024), 2024 年 2 月 19 日, オンライン開催.