

【論文】

簡易形電動車いすのための片流れ検知・軽減走行技術による操作量変化の 予測モデル構築

Estimation Model of Joystick Input Changes Induced by a Downhill Turning Prevention Control Mounted on a Powered Manual Wheelchair

硯川潤(正会員)*, 木下崇史(非会員), 加茂光広(非会員)**, 飯田教和(非会員)**

岩田拓也(非会員)***, 松本治(非会員)***, 井上剛伸(正会員)

Jun Suzurikawa*, Takafumi Kinoshita, Mitsuhiro Kamo**, Norikazu Iida**
Kakuya Iwata***, Osamu Matsumoto***, Takenobu Inoue

Abstract

In order to improve safety of powered wheelchairs running on cross sloped surfaces, we have developed a downhill turning prevention control (DTPC) system. The effect of DTPC on wheelchair maneuvering has been quantified and evaluated by an evaluation experiment, where six wheelchair users participated. In this study we characterized in detail DTPC-induced changes of the evaluation measures in order to construct a quantitative criterion for screening target users of DTPC. As a result, we found that DTPC-induced improvement in the total scores of the evaluation measures positively correlated with the total scores without DTPC. The multiple regression analysis revealed that the evaluation measures derived from the wheelchair behavior without DTPC are secondary factors on the evaluation score improvement in addition to those from the joystick input. The measures without DTPC are likely to negatively correlate with the controlling skills of the drivers. These results of the statistical analyses, therefore, suggest that the benefit from DTPC will be larger as controlling skill of the users is worse.

Key Words

Smart wheelchair, Cross slope, Downhill turning, Safety, Evaluation

2012年 2月 9日受理

2012年 6月 25日最終原稿受理

国立障害者リハビリテーションセンター研究所, 埼玉県所沢市並木 4-1

* (独) 科学技術振興機構 さきがけ, 埼玉県川口市本町 4-1-8

**アイシン精機(株), 愛知県刈谷市朝日町 2-1

*** (独) 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市梅園 1-1-1
Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, 4-1, Namiki, Tokorozawa, Saitama, Japan

*PRESTO, Japan Science and Technology Agency, 4-1-8, Honcho, Kawaguchi, Saitama, Japan

1. はじめに

電動車いすの安定走行を阻害する外的要因の一つに、路面の傾斜が挙げられる。特に、車いすの進行方向に対して直交した傾斜のある路面（横傾斜路）では、前部キャスタが下り勾配方向に流される「片流れ」という現象が知られており、その危険性が指摘されてきた¹⁾。

筆者らのグループでは、この片流れ現象を検知し、進路のずれを自動的に補正する片流れ検知・軽減走行技術（downhill

**AISIN SEIKI Co., Ltd., 2-1, Asahi-machi, Kariya, Aichi, Japan

***National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki, Japan

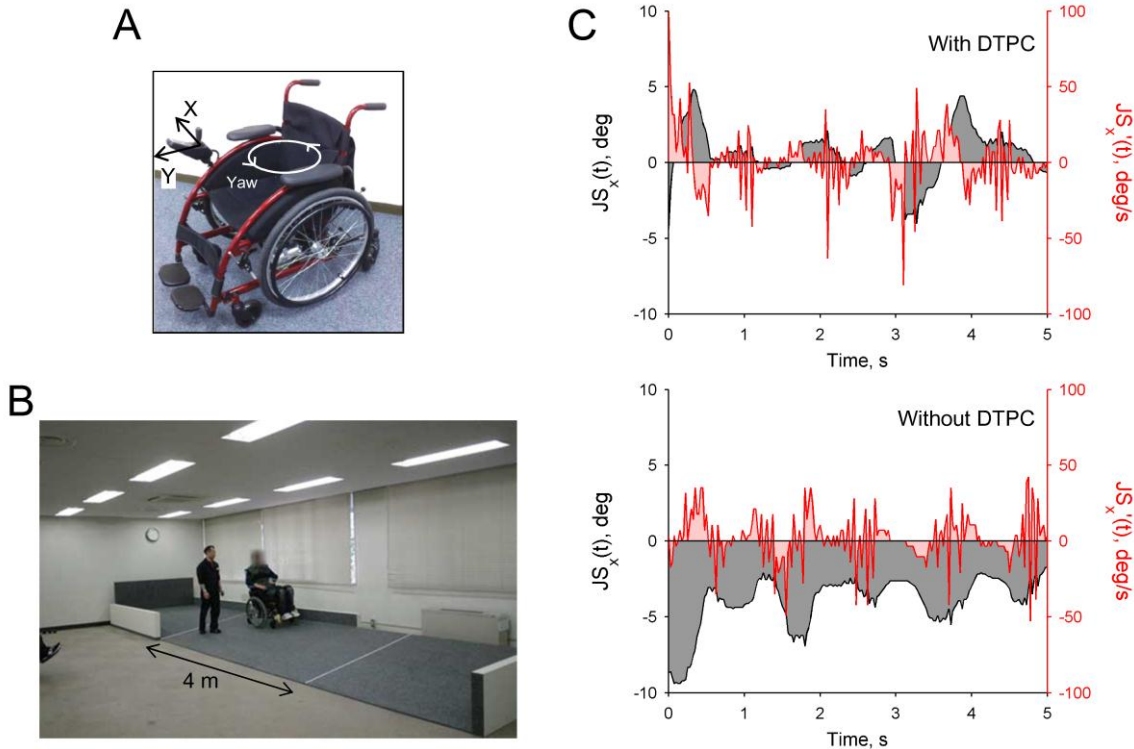


Fig. 1 Experimental setup and typical measurement results. (A) Developed power wheelchair with the downhill turning detection and prevention system. Positive directions of joystick control and yaw rate are indicated by arrows. (B) Test cross slope with the angle of 8°. (C) Time courses of x-axis joystick angular displacements. Angular displacements (black, left axis) and the displacement variations (red, right axis) are shown for typical trials with (top panel) and without (bottom) DTPC by the same subject. Joystick inputs for the downward direction of the cross slope (leftward to the travelling direction in B) are defined as positive⁵⁾.

turning prevention control, DTPC) の開発を進めている^{2),3)}. 本システムは簡易形電動車いすを対象とした装置であり、モータユニットと一体化させることで様々な車体に搭載可能である。ジョイスティック入力と車体の実挙動のずれを、車体に搭載したジャイロセンサで計測し、駆動輪制御系にフィードバックすることで、横傾斜路での片流れが軽減されることを確認してきた⁴⁾。また、電動車いすユーザである障害当事者を被験者とした評価実験から、DTPC が実際のジョイスティック操作量を軽減することを確認している⁵⁾。しかし、どの操作パラメータに対して有効であるかや、どの程度の操作技能を持つ操作者に有用であるかなど、DTPC がジョイスティック操作に与える影響の詳細は、未だ十分に精査されていない。操作者の負担が、どのような機序で軽減されるかを明確にすることは、本走行技術のターゲットユーザを確定し、コストベネフィットを推定する上で、極めて重要な課題である。

そこで本研究では、被験者の操作技能と DTPC による操作量変化の関係性を分析することで、ターゲットユーザ選定のための基礎的な数値指標を構築することを目的とした。まず、これまでの走行実験で得られた評価指標⁵⁾の判別分析を通して、単純な有意差検定では明らかにならない評価指標変化の検出を試みた。さらに、DTPC 無効時の評価指標値から同有効時の指標

値変化を予測するための回帰モデルを構築し、DTPC の適用が効果を持つユーザ層を定量的に同定するための指標とした。

2. 方法

以下に、開発した簡易形電動車いすの走行評価実験と、そこで得られた操作・走行ログからの評価指標算出、および評価指標間の関係性分析の詳細を示す。なお、本実験は国立障害者リハビリテーションセンター倫理審査委員会 (22-100) 及び日本生活支援工学会倫理審査委員会 (10-01) の承認を得て実施した。

2.1 走行評価実験

(1) 片流れ検知・軽減走行技術を搭載した電動車いす

Fig. 1A に、本研究で用いた簡易形電動車いすを示す。車体は、日本工業規格 (JIS T 9203:2010) に則して製作され、座面側方に DTPC のための回路基板が搭載されている。同制御では、ジョイスティックから入力されたヨー軸目標角速度と、基板に搭載したレートジャイロで取得した実際の角速度 (yaw rate) の差分値、およびその積分値が 0 になるように目標角速度が補正される。なお、本実験に用いた電動車いすの諸元と制御アルゴリズムの詳細は、参考文献 2) および 3) に記載されている。

(2) 被験者

簡易形電動車いすを常用する6名の肢体不自由者を被験者とした。被験者全員が、電動車いすを移動の主たる手段として1年以上常用した経験を有する。疾患・障害種別の内訳は、ポリオ2名、脊髄小脳変性症1名、膠原病1名、頸髄損傷1名、脳梗塞による片麻痺1名である。

(3) 走行実験とデータ記録

Fig. 1B に示したように、屋内に構築した横傾斜試験路での走行評価実験を実施した。DTPC の効果を検証するために、同制御が有効・無効の状態それぞれ走行データを取得した。被験者は、制御が有効・無効の設定で、それぞれ15回ずつ試験路を走行した。走行前には、傾斜のない通常路面において5分程度の自由走行時間を設けた。走行時は、転倒などに備えて作業療法士が車いす側方を並走した。試験中の走行速度は3.8 km/h を上限に設定し、被験者には「自身に快適な速度で、できる限り直進する」ように指示した。路面の傾斜角は8度、全長・全幅はそれぞれ9 m・2 m であり、そのうち4 m を走行データの分析対象区間とした。走行データとして、左右駆動輪角速度、ジョイスティック操作角度（左右、前後2軸）、車体のヨー軸角速度を、40 Hz のサンプリング周波数でそれぞれ記録した。

2.2 評価指標の算出

(1) 算出方法

計測データから走行時の操作量・操作安定性・走行安定性を評価するための数値指標を算出した。評価指標は、4 m 走行後の片流れ量、4 m 走行時間、ジョイスティック操作角度の積分値と、角度変化の積分値（左右、前後方向）、ヨー軸回転角度とヨー軸角速度の積分値の計8指標である。

左右方向のジョイスティック操作角の計測例を Fig. 1C に示す⁵⁾。横傾斜による進路のずれを修正するためのオフセット操作が顕著に表れていることがわかる。一方で、角度変化にはDTPC 有効・無効時で大きな変化はなかった。そこで、操作量とその安定性を示す指標として、ジョイスティック操作角度の積分値と、角度変化の積分値を各試行についてそれぞれ計算した。以下、前者を操作量 (joystick displacement amount, JDA)、後者を操作変化量 (joystick displacement variation amount, JDVA) と呼ぶ。次の2式に示した通り、中立軸からの倒し角度、および角度変化量を、左右（または前後）の方向に関わらず正として扱った。

$$JDA_x = \int_{T_{start}}^{T_{goal}} |JS_x(t)| dt \quad \text{--- (1)}$$

$$JDVA_x = \int_{T_{start}}^{T_{goal}} \left| \frac{d}{dt} JS_x(t) \right| dt \quad \text{--- (2)}$$

ここで、 $JS_x(t)$ は左右方向の操作角度（進行方向に対して左側、すなわち下り勾配側が正）を、 T_{start} ・ T_{goal} は分析対象区間の通過開始・終了時間をそれぞれ表す。

ヨー軸回転角度とヨー軸角速度の積分値は、車体の進行方向のぶれとその安定性を示す指標である。以下、前者をヨー軸変位量 (yaw angular displacement amount, YDA)、後者をヨー軸変化量 (yaw rate amount, YRA) と呼ぶ。ヨー軸角速度

は、左右駆動輪角速度差から算出し、その積分値を回転角度とした。式 (1), (2) と同様に、路面進行方向に対する振れ角の絶対値を積分した。

(2) 評価指標変化の概要

Fig. 2 に、制御有効時・無効時の各評価指標値を示した。被験者ごとの15試行分の平均値は線で示されている。左右方向操作量 (Fig. 2D(i)) に、DTPC 有効時・無効時の間で統計的に有意な差が検出された ($p = 3.45 \times 10^{-4}$; two sided t-test)。制御有効時の同操作量は、無効時に対しておよそ3分の1に軽減されたことが分かった。これらの結果は、開発した片流れ検知・軽減走行技術が、横傾斜路走行時の操作負担軽減に有効であることを示唆している。また、左右方向操作量以外の指標が変化しなかったことは、制御無効時に片流れの補正に必要な左右方向のジョイスティック入力のみが独立して操作され、その補正操作が他の操作パラメータには一切影響を与えなかったことを示す⁵⁾。なお、各被験者の一連の試行において、慣れの影響を示すような統一的な指標の変化は検知されなかった。

2.3 統計分析

DTPC による評価指標の変化と評価指標間の関係性を分析するために、i) 任意の2指標間での制御有効・無効時の線形判別分析、ii) 評価指標の合計得点の比較と非制御時の得点とDTPC による得点改善幅の関係性分析 iii) 制御無効時の指標値を説明変数とした操作量軽減幅の重回帰分析、をそれぞれ行った。数値解析ソフトウェアには、Matlab (Mathworks Inc.) を用いた。

(1) 評価指標の線形判別

DTPC による変化に有意性が確認された左右方向操作量と、他の評価指標を、試行ごとにそれぞれ X, Y 軸にとり、2次元での線形判別分析を用いて DTPC の有効・無効を判別することを試みた。得られた判別結果の誤判別率を、Y 軸に乱数をとった場合の誤判別率と比較することで、Y 軸に設定した指標がDTPC による影響を受けていたかどうかを検証した。

(2) 指標の合計得点の比較

評価指標の変化を総合的に検証するために、8指標の合計得点を比較した。また、DTPC 無効時の得点と、DTPC による得点改善幅の関係性を分析した。操作や走行の安定性を示す8指標は、全て操作技能と負の相関を持つと考えられる。なお、合計得点の算出時には、各指標をそれぞれの平均値で除して規格化した。

(3) 重回帰分析による負担軽減幅の予測

前項 (2) で判明した関係性の詳細を分析するために、左右方向操作量の改善幅をアウトカム変数、制御無効時の評価指標を説明変数として、回帰モデルの構築を試みた。説明変数は3種類を最大とし、総当り的に重回帰分析を行った。

3. 結果と考察

3.1 評価指標の線形判別

操作評価指標の中には、統計的な有意性は見られなかったものの、制御有効時・無効時に被験者間で一貫した変化が見られ

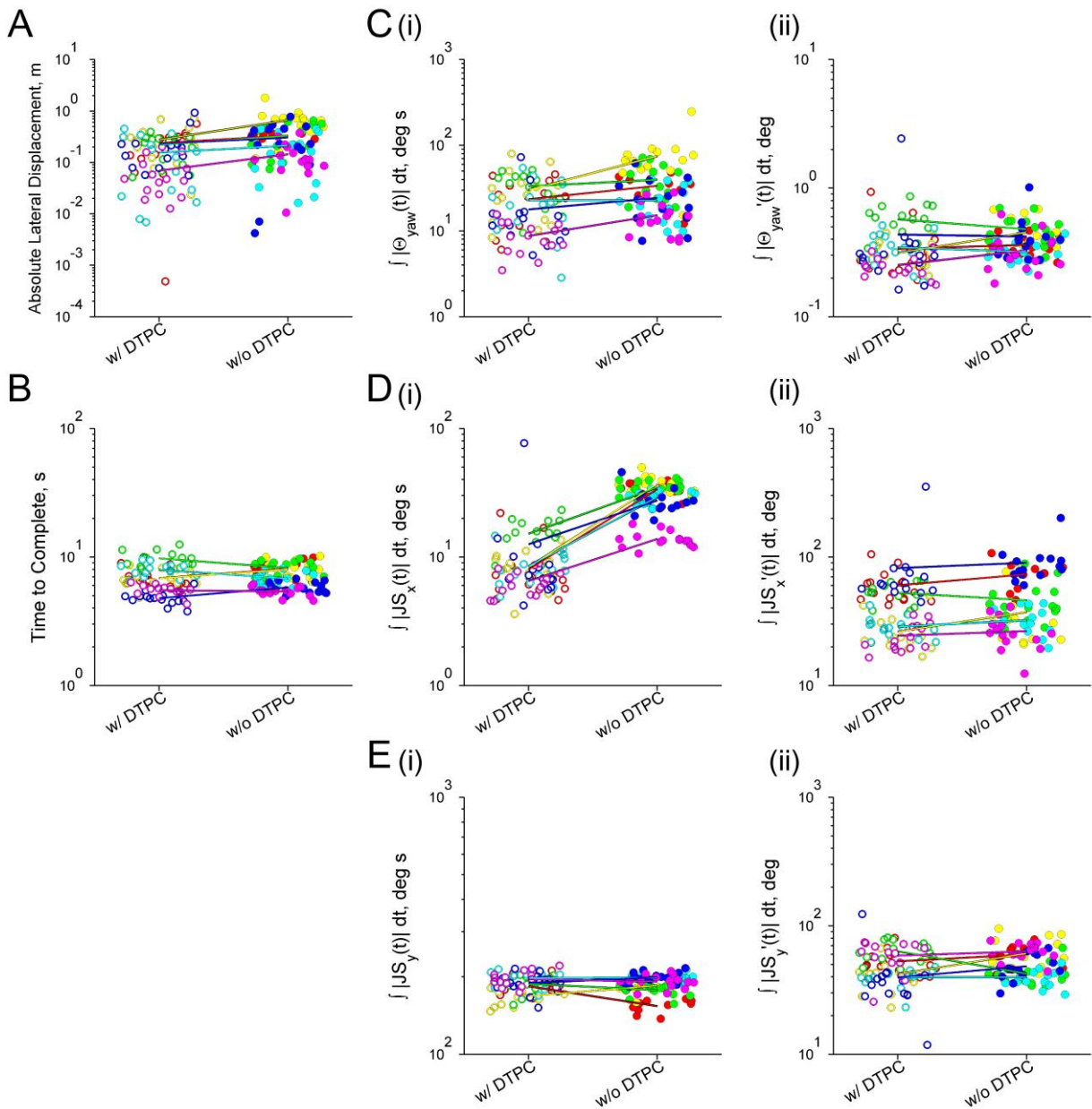


Fig. 2 Comparison of evaluation measures obtained in trials with and without DTPC. (A) Absolute lateral displacement of the wheelchair. (B) Time to complete the 4-m test course. (C) Yaw angle displacement amount (i) and yaw rate amount (ii). (D) X-axis joystick displacement amount (i) and variation amount (ii). (E) Y-axis joystick displacement amount (i) and variation amount (ii). Each line indicates mean values for a subject. Colors of the dots and lines correspond with the subjects (n=6). A part of this data set is already published in ref. 5.

たものがあつた。そこで、これらの評価指標の DTPC による変化を検証するために、左右方向操作量に他の評価指標を加えた 2 次元での制御有効・無効の線形判別分析を行った。左右方向操作量を X 軸に、前後方向の操作変化量、車体のヨー軸変位量、左右方向の操作変化量をそれぞれ Y 軸にとつた、2 次元の判別分析結果を Fig. 3 に示す。Y 軸に乱数を用いた制御有効・無効

の誤判別率は 0.115 ± 0.006 (平均 \pm 標準偏差, 1000 試行) であり, Fig. 3 に示した全ての例がそれを上回つた。この結果は、平均値の単純比較では検出されなかつたが、左右方向操作量以外の評価指標も DTPC の影響を受けた可能性があることを示唆している。

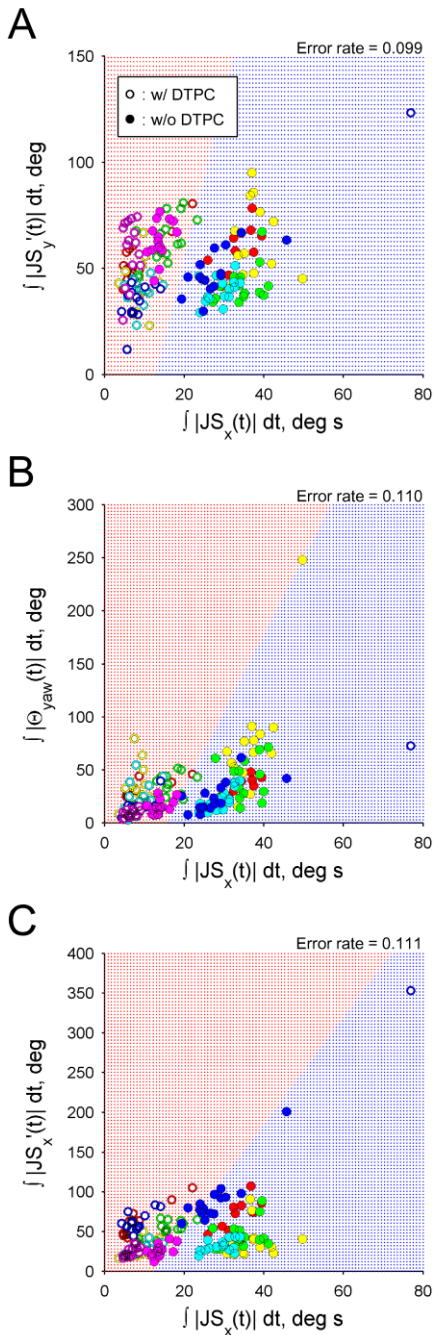


Fig. 3 Linear discriminant analysis of the trials with and without DTPC. Two dimensional plots of the evaluation measures were analyzed with the x-axis of JDA_x and the y-axis of $JDVA_y$ (A), YDA (B) and $JDVA_x$ (C), respectively. The classification results are shown as area colors (red: w/ DTPC, blues: w/o DTPC). Misclassification rates are shown on the top of the panels. Colors of the dots correspond with the subjects (n=6). Open and closed dots indicate the trials with and without DTPC, respectively.

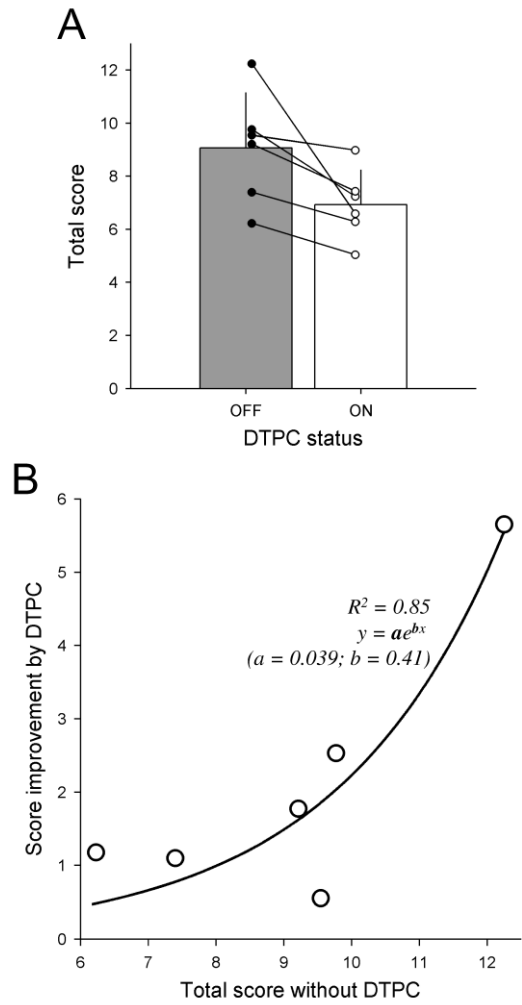


Fig. 4 Score improvement by DTPC. (A) Total scores with and without DTPC. Error bars show standard deviations. (B) Score improvement values as a function of the total scores without DTPC. A fitted curve is shown by the solid line.

走行課題遂行中の操作ログを分析した Sorrento らの先行研究では、走行課題の難易度が高いほど、操作経験が豊かな車いす常用者と初心者の健常者の中で操作安定性の差が顕著になることが示された⁶⁾。この知見を考慮すると、本研究で用いたような単純な形状の試験路ではなく、凹凸や二次曲面のような、より高度な操作が必要な路面を対象とすることで、他の操作評価指標の変化も明確にできる可能性がある。

3.2 指標の合計得点の比較

Fig. 4A に、DTPC 有効・無効時の指標合計得点を示す。6 人の被験者全員で一様に得点は減少し、得点変化は有意な傾向を示した ($p = 0.093$, Mann-Whitney U-test)。Fig. 4B には、DTPC 無効時の得点に対する有効時の得点改善幅を示す。実線で示したように、両者は指数関数で近似でき、無効時の得点が高い被験者ほど、DTPC による得点改善幅は大きくなった。

制御無効時の評価指標得点は、操作技能を反映していると考

Table 1 Multiple regression analysis with JDA_x improvement as an outcome variable (sorted with p-values).

Explanatory variables	R ²	p	Coefficient estimates*			
			Constant	b ₁	b ₂	b ₃
JDA _x	0.843	0.0098	-5.04	0.836	—	—
JDA _x , YRA, YDA	0.9924	0.0113	11.9	0.83	-56.6	0.157
JDA _x , YRA	0.9159	0.0244	4.7	1.03	-39.5	—
JDA _x , JDVA _y , YRA	0.9813	0.028	-7.16	1.11	0.198	-41.1
JDA _x , JDVA _y	0.9024	0.0305	-16.7	0.897	0.188	—
JDA _x , YDA	0.8655	0.0493	-3.54	0.69	0.078	—

*: Coefficient estimates (b₁₋₃) are arranged in the same order as the explanatory variables.

JDA: Joystick displacement amount, JDVA: Joystick displacement variation amount, YDA: Yaw-angular displacement amount, YRA: Yaw rate amount.

えられ、得点が高いほど操作の安定性が低く操作技能は劣ると考えられる⁶⁾。よって、Fig. 4Bの結果から、DTPCによる操作負担の軽減効果は、操作技能の劣るユーザほど大きくなると推測できる。Simpsonらは、本研究で扱ったような操作介入を伴う安全システムを搭載した車いす (smart wheelchair, SWC) は、運動機能障害などで操作に支障がある者が大きなベネフィットを得るとしている⁷⁾。ここに示した結果は、この主張を支持するエビデンスであり、DTPCが、障害特性や経験の浅さが原因で操作技能の未熟なユーザに対して有用であることを示唆している。

3.3 重回帰分析による負担軽減幅の予測

前節で明らかになったDTPCによる指標得点変化の詳細を分析するために、個々の評価指標間の重回帰分析を行った。Table 1に、左右方向操作量の改善幅をアウトカム変数、制御無効時の評価指標を説明変数とした重回帰分析のうち、p値が5%を下回った結果を示す。左右方向操作量に加えて、ヨー軸変位量・変化量といった車体挙動の安定性を示す評価指標を組み合わせることで、DTPC無効時の評価指標のみから高い精度で操作量の軽減幅を推定できることが分かった。さらなる被験者数の確保が必要ではあるが、このような回帰モデルはDTPCの効果を障害種別や操作技能レベルから予測するために活用でき、適切なターゲットユーザのスクリーニングに応用可能である。

これまでに開発されてきたSWCの多くは、その効果を適切に評価されていないものが多かった。例えば、筆者らはSimpsonらによる総説⁸⁾をもとに、42機種71報のSWC開発事例を精査した。その結果、障害当事者を被験者とした評価を実施した事例は7件、心理的な効果にまで着目した評価を実施した事例はわずかに2件であることがわかった。Simpsonらも指摘するように、安全性やシーティングなどの問題が障害当事者を被験者とした評価実験を困難にしていると考えられ、実用化を妨げる一因となっている。しかし、電動車いすの操作ログを分析した先行研究⁶⁾や本研究で示した評価指標変化を考慮すると、SWCの効果は操作技能や操作経験に大きく影響を受けることが推測される。よって、SWCのコストベネフィットを正確に見積もり、適用できるユーザの範囲を確定するためには、障害当事者を対象とした評価実験が不可欠であり、本研究で示した評価・

分析手法はそのようなプロセスを促進する基礎的な指針となり得ると考える。

4. おわりに

本研究では、簡易形電動車いすに搭載された片流れ検知・軽減走行技術 (DTPC) の有効性を多角的に評価するために、肢体不自由者を被験者とした走行評価実験から得られた、複数の走行評価指標の関係性を分析した。その結果、i) 単純な有意差検定では明らかにならない程度の微小な影響を、DTPCから受ける評価指標が存在すること、ii) ユーザの操作技能が低いほど、DTPCの効果が大きくなる傾向が見られること、iii) ジョイスティック操作量に加えて、車体挙動に関する指標がDTPCによる操作変化に影響を与えていること、などが明らかになった。これらの結果は、操作量変化の統計モデル構築によって、DTPCが効果を発揮するユーザ層のスクリーニングが可能であることを示唆している。さらに、走行・操作ログの分析が、片流れ検知・軽減走行技術のような操作介入を伴うSWCの有用性を定量的に評価するために有用な手法であることが示されたと考える。

本研究の一部は、厚生労働省障害者自立支援機器等開発促進事業の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) Brubaker CE, McLaurin CA, McClay IS, Effects of side slope on wheelchair performance. *J. Rehabil. Res. Dev.* 1986;23: 55-57.
- 2) 厚生労働省障害者自立支援機器等開発促進事業, 安全で使い勝手の良い簡易形電動車いすに関する開発, 平成22年度 総括・分担報告書, 2011.
- 3) Takei T, Suzuki Y, Matsumoto O, Adachi Y, Sasaki Y, Kamo M, Development of assistive technologies for safe operation of electric wheelchairs on sloping sidewalks and grade height differences. *Proc. IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) 2010*; 55-57.
- 4) 硯川潤, 他, 操作介入を伴う安全装置を搭載した電動車いす

の臨床評価. 第 25 回リハ工学カンファレンス講演論文集
2010;229-230.

- 5) Suzurikawa J, et al., Evaluation of Changes in Power Wheelchair Maneuver Induced by a Downhill Turning Prevention Control on Cross Sloped Surfaces. IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng., in press.
- 6) Sorrento GU, Archambault PS, Routhier F, Dessureault D, Boissy P, Assessment of Joystick control during the performance of powered wheelchair driving tasks. J. NeuroEng. Rehabil. 2011; 8:art. # 31.
- 7) Simpson RC, LoPresti EF, Cooper RA, How many people would benefit from a smart wheelchair? J. Rehabil. Res. Dev. 2008;45:53-71.
- 8) Simpson RC, Smart wheelchairs: A literature review. J. Rehabil. Res. Dev. 2005;42:423-436.