

## O2-8

## 片流れ検知・軽減走行技術による簡易形電動車いすの操作負担変化の評価

## Evaluation of Changes in Power Wheelchair Maneuvering Induced by a Detection and Prevention System of Downhill Turning on Cross Slope Surfaces

○ 硯川潤, 木下崇史, 井上剛伸 (国立障害者リハビリテーションセンター研究所)

加茂光広, 飯田教和 (アイシン精機株式会社) 岩田拓也, 松本治 (産業技術総合研究所)

Jun SUZURIKAWA, Takafumi KINOSHITA, Takenobu INOUE, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

Mitsuhiro KAMO, Norikazu IIDA, AISIN SEIKI Co., Ltd.

Kakuya IWATA, Osamu MATSUMOTO, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

**Abstract:** In order to improve safety of wheelchairs we have developed a detection and prevention system of downhill turning on cross slope surfaces. The effect of the system on wheelchair maneuvering, however, has not been well clarified. In this study we quantitatively characterized changes in maneuvering strategies induced by the downhill turning prevention control (DTPC). Six subjects with physical disabilities that normally use a power wheelchair drove a test wheelchair on an 8-degree cross slope with and without DTPC under measurement of joystick excursions. Among several evaluation measures calculated from the joystick logs, the x-axis joystick displacement amount was found to be significantly decreased by DTPC, while other measures remained unchanged with DTPC. This observation means that the subjects themselves compensated for the downhill turning tendency by their joystick inputs. This result strongly suggests that DTPC can reduce the burden of maneuvering on cross slope surfaces.

**Key Words:** Smart wheelchair, Cross slope, Safety, Evaluation

## 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、前部キャスト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<sup>(1)</sup>。

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安全装置の開発を進めている<sup>(2)</sup>。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<sup>(3)</sup>。しかし、この片流れ検知・軽減制御が実際の電動車いす操作に与える影響は、未だ十分に検討されていない。操作者の負担が、どのように、そしてどの程度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、片流れ検知・軽減走行技術を搭載した簡易形電動車いすの走行実験を通して、同走行技術が車いす操作に与える影響を解明することを目的とする。さらに、被験者の操作技能と同走行技術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の構築を試みる。

## 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 片流れ検知・軽減走行技術を搭載した電動車いす

図 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、

側面に片流れ検知・軽減制御のための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) の差分値とその積分値が、0 になるように目標角速度が補正される。なお、車いすの諸元と制御アルゴリズムの詳細は、参考文献 (2) に記載されている。

## 2-2 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。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。

## 2-3 走行実験

図 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。片流れ検知・軽減制御の効果を検証するために、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。

路面の傾斜角は 8 度、全長は 9 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 (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。

## 2-4 データ解析

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下記のように算出した。

- ジョイスティック操作角：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。

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

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

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：車体の進行方向のぶれとその安定性を示す指標として、ヨー軸回転角度とヨー軸角速度の積分値をそれぞれ計算した。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。

片流れ検知・軽減制御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) 同制御有効・無効時の各指標の有意差検定、ii) 任意の2指標間での制御有効・無効時の線形判別分析、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。

### 3. 結果と考察

#### 3-1 走行・操作指標の比較

図2に、片流れ検知・軽減制御有効時・無効時の左右方向のジョイスティック操作角度 ( $JS_x$ ) とその微分値を示す。

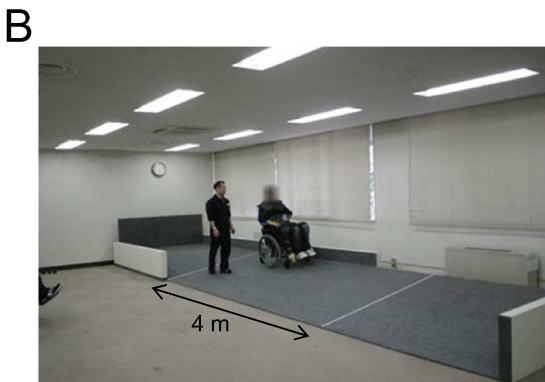


Fig. 1 (A) Developed power wheelchair with the downhill turning detection and prevention system. (B) Test cross slope with the angle of 8°.

両者は同一被験者による試行の測定結果である。制御無効時は、片流れを抑制するために、被験者自身が登り方向（グラフでは負の方向）にバイアスをかけて操作していることがわかる。この操作方向のバイアスは、制御有効時には見られず、片流れが自動的に軽減されたことを示している。一方で、操作角度の変化量 ( $d(JS_x)/dt = JS_x'$ ) には制御有効時・無効時の間で目立った差は見られなかった。

図3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分で示されている。図2でも見られたように、左右方向操作量 (図3D(i)) に、制御有効時・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)。制御有効時は無効時に対しておよそ3分の1に操作量が軽減されたことが分かった。しかし、4m走行後の試験路上での車体の左右変位 (図3A) や走行所要時間 (図3B) を含む他の指標には、有意な ( $p < 0.05$ ) 差は検出されなかった。

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。電動車いす使用者が持つこの極めて安定した操作能力は、健常者と車いす常用者の操作ログを比較し、後者の操作入力がより安定していることを明らかにした先行研究の結果と一致する<sup>(4)</sup>。

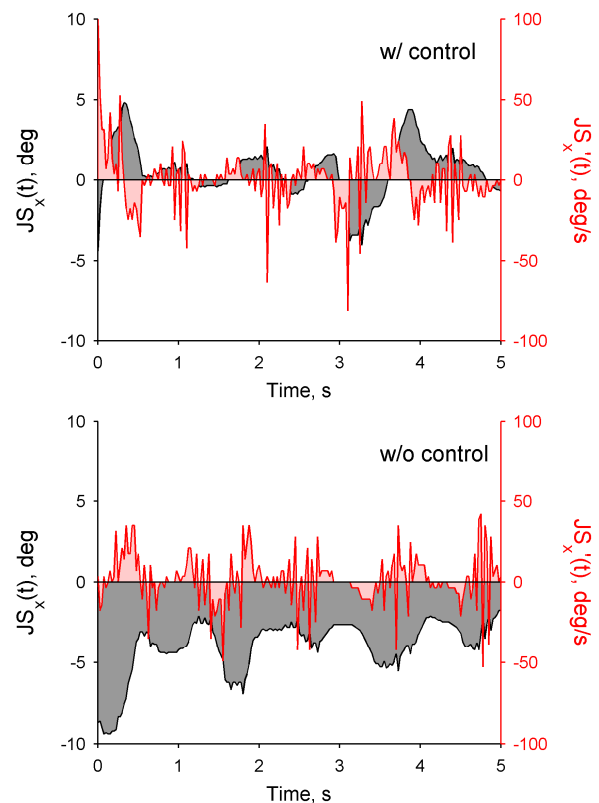


Fig. 2 Time courses of x-axis joystick angular displacements. Angular displacements (black, left axis) and the displacement variations (red, right axis) are shown for typical trials with (top panel) and without (bottom) the downhill turning prevention control by the same subject. Joystick inputs for the downward direction of the cross slope (leftward to the travelling direction in Fig. 1B) are defined as positive.

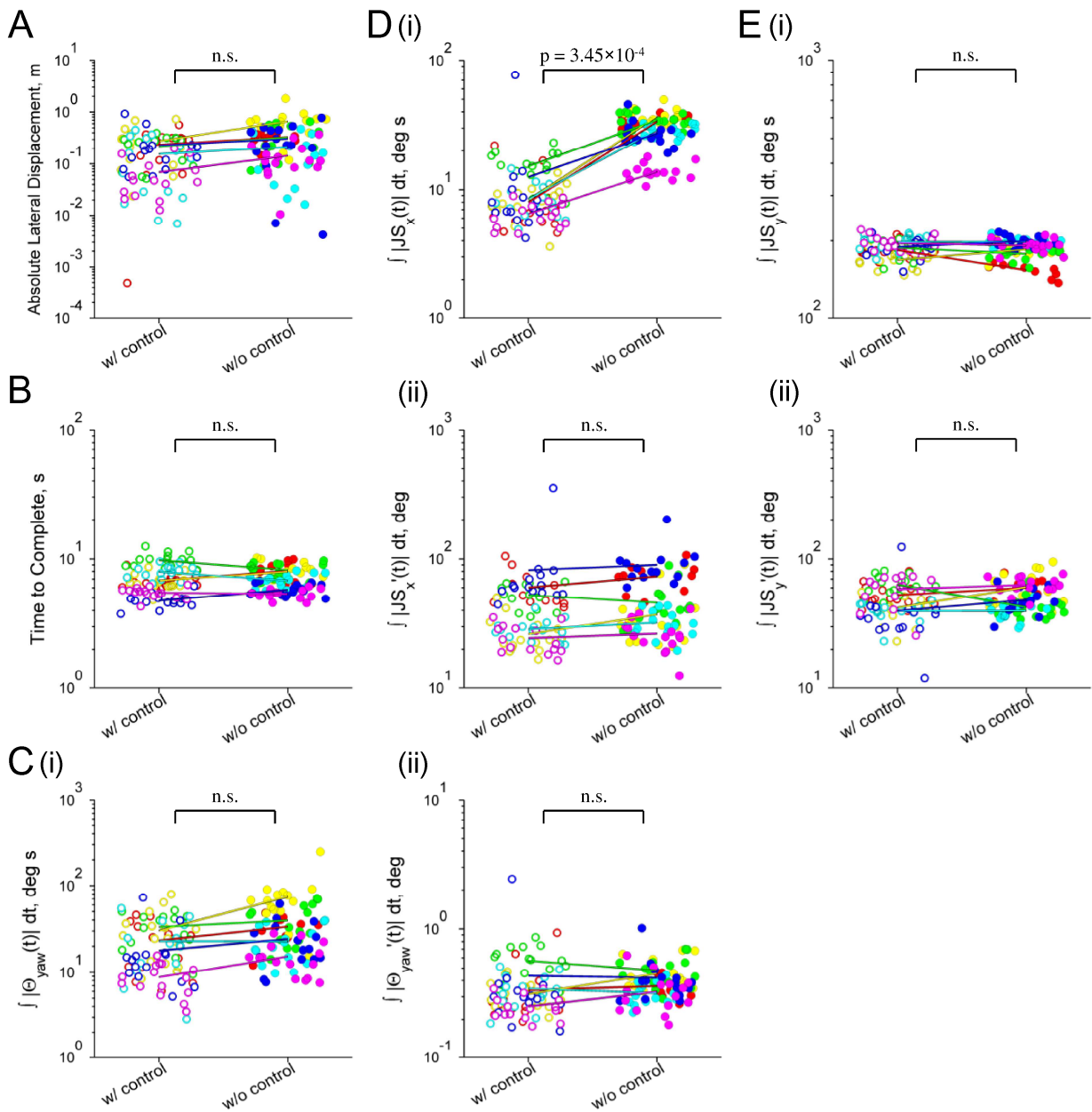


Fig. 3 Comparison of evaluation measures obtained in trials with and without the downhill turning prevention control (DTPC). (A) Absolute lateral displacement of the wheelchair. (B) Time to complete the 4-m test course. (C) Yaw angle displacement amount (i) and yaw rate amount (ii). (D) X-axis joystick displacement amount (i) and variation amount (ii). (E) Y-axis joystick displacement amount (i) and variation amount (ii). Results of a two sided t-test are shown with p values or “n.s.” (no significance, when  $p \geq 0.05$ ). Each line indicates mean values for a subject. Colors of the dots and lines correspond with the subjects ( $n=6$ ).

### 3-2 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たものがあつた。そこで、これらの評価指標の片流れ検知・軽減制御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図4に示す。左右方向操作量のみを用いた制御有効・無効の誤判別率は0.116であり、図4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、片流

れ検知・軽減制御の影響を受けた可能性があることを示唆している。

前述の Sorrent らの先行研究では、走行課題の難易度が高いほど、車いす常用者と健常者の間で操作安定性の差が顕著になることが示された<sup>(4)</sup>。本研究では、横傾斜角が一定の単純な形状を試験路として用いたが、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。

### 3-3 重回帰分析による負担軽減幅の予測

最後に、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。表1に、p値が5%を下回つた重回帰結

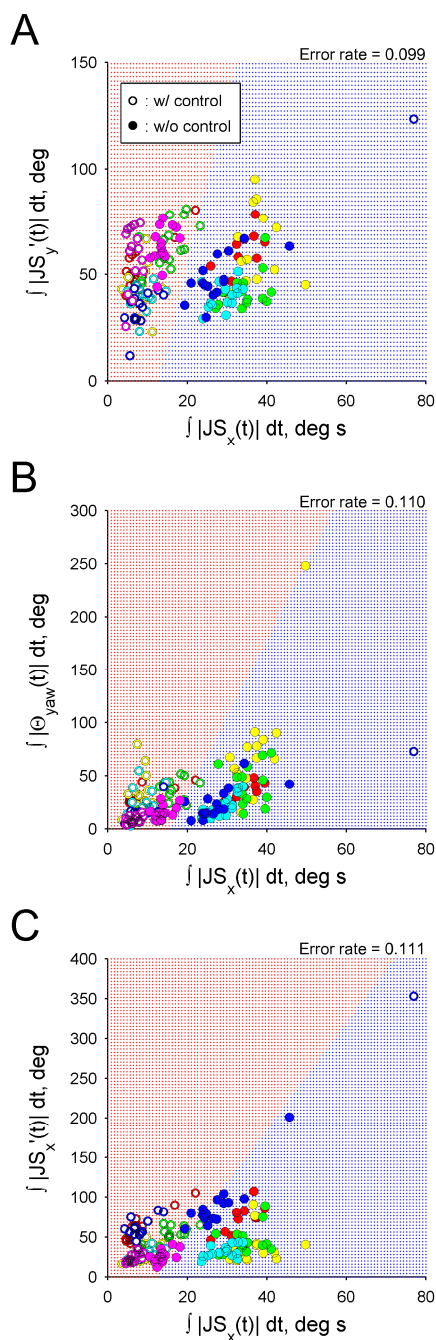


Fig. 4 Linear discriminant analysis of the trials with and without the downhill turning prevention control. Two dimensional plots of the evaluation measures were analyzed with the x-axis of  $JDA_x$  and the y-axis of  $JDVA_y$  (A),  $YDA$  (B) and  $JDVA_x$  (C). The classification results are shown as area colors (red: w/ control, blues: w/o control). 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 the control, respectively.

果を示す。左右方向操作量に加えて、ヨー軸変位量・変位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て、制御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。

制御無効時の操作評価指標は、操作技能を反映していると考えられる<sup>(4)</sup>。よって、このような回帰モデルは、本走行技術が有効に作用する障害種別や操作技能レベルをスク

Table 1 Multiple regression analysis of  $JDA_x$  improvement on measures without the DTPC (sorted with p-values).

Explanatory variables	$R^2$	$p^*$
$JDA_x$	0.843	0.0098
$JDA_x, YRA, YDA$	0.9924	0.0113
$JDA_x, YRA$	0.9159	0.0244
$JDA_x, JDVA_y, YRA$	0.9813	0.028
$JDA_x, JDVA_y$	0.9024	0.0305
$JDA_x, YDA$	0.8655	0.0493

\*: F-test.

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

リーニングし、適切なターゲットユーザを確定するために活用できる。Simpson らが指摘するように、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) は、障害当事者を被験者とした評価実験が困難であり、ターゲットユーザを確定する手がかりを得にくいことが課題であった<sup>(5)</sup>。本研究で示した定量的な操作量変化は、このような課題を解決する基礎的なエビデンスであり、今後の実用化に向けた有効な数値評価指標を確立できたと考える。

#### 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の有効性を評価するために、肢体不自由者を被験者とした走行評価実験を行い、同走行技術による操作量変化を定量化した。その結果、同制御有効時は無効時に比較して左右方向のジョイスティック操作量が有意に減少することがわかった。他の操作評価指標が変化しなかったことから、操作者自身が行っている片流れ現象の補正を、開発した制御システムが自動的に代行したことが示されたと考える。また、操作量変化とその他の評価指標の関係性分析の結果からは、いくつかの指標を複合的に用いることで、本走行技術が効果的なユーザ層のスクリーニングが可能であることが示唆された。

本研究は、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.*, vol. 23, pp. 55-57, 1986.
- (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) 硯川潤, 井上剛伸, 加茂光広, 鈴木雄介, 松本治, 本間敬子, 佐藤雄隆, 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, pp. 229-230, 2010
- (4) 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.*, vol. 8, art. # 31, 2011.
- (5) Simpson RC, Smart wheelchairs: A literature review, *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 42, pp. 423-436, 2005.