

スライド式操作型車いすにおける触覚フィードバック付加が 操作性に及ぼす影響

The influence on controllability of the slide operation wheelchair

by the addition of tactile feedback

○ 嶋津祐太 (東京大学) 二瓶美里 (東京大学) 鎌田実 (東京大学)

Yuta SHIMAZU, The University of Tokyo
Misato NIHEI, The University of Tokyo
Minoru KAMATA, The University of Tokyo

Abstract: An powered wheelchair to operate using capacitance type slider sensor was developed for the purpose of the cancellation of the factors that the spread of powered wheelchair did not advance to in elderly facilities. The behavior of this wheelchair is modeled after that of manual wheelchair by programming its motion model and decided by the slide operation velocity. About this wheelchair, it was proved that elderly people had bigger crosswise of the slide operation velocity than young people when they operated it with the intention to go straight. To improve the controllability for elderly people, we focused on a decline in their perception ability of hand movement velocity and tried to add tactile feedback interface considering the feature of elderly people's tactile. By comparing the controllability after addition of tactile feedback with that before it, it was suggested the tactile feedback made most elderly people's controllability better.

Key Words: Welfare Engineering, Wheelchair, Tactile feedback, Elderly person

1. はじめに

近年、日本ではますます高齢化が進んでおり、高齢者施設の入居者も増加している。施設内における移動手段について調べると、施設入居者の約65%が車いすを使用しており、さらにその中の約55%については、自分で操作を行う自走用手動車いすではなく、走行において介助者が必要な介助用車いすを使用しているとの報告がある。小児や若年の身体障害者においては、自走用手動車いすを使用できない場合には、電動車いすが利用されており、それにより活動性の向上や生活の質の向上があると報告されている。したがって、高齢者においても電動車いすを導入すれば同様の効果があると考えられるが、現状では、電動車いすの利用者は約0.1%程度にすぎないと報告されている。

そこで、筆者らはこれまで高齢者施設での電動車いす導入の阻害要因についての調査を行ってきた。調査の結果、主な導入阻害要因として、把持機能が不可欠であることや、廃用（動かさないことによる関節や筋肉の拘縮）の危険性があることが抽出された。これらの阻害要因の解消を目指した新しい電動車いすの検討を行い、静電容量式のスライダセンサを有する入力インタフェースを搭載したスライド式操作型車いす (Slide Flex) を開発した。図1にプロトタイプを示す。この電動車いすは、左右に取り付けられたスライダセンサ上で手を軽く触れながらスライドさせることにより操作を行うため、把持力を必要とせず自重負荷を与えることにより筋力低下にも対応できるというメリットがある。その反面、手動車いすにおける操作反力のようなフィードバックがないため、意図した操作を行うのが難しいというデメリットがある。

これらのデメリットを解消する方法として、触覚的なフィードバックによる位置覚を向上させる方法が考えられる。触覚フィードバックの既存の研究としては、手を能動的に動かすものと、受動的なものに分類される。前者は点字や

触地図など識別しやすい点字に関する研究で⁽²⁾、後者にはタクトイルセンサなどに多く用いられている静電アクチュエータを用いた触覚に関する研究⁽³⁾などがある。筆者らはこのような触覚フィードバックを Slide Flex に適用することによって、操作性が向上するのではないかと考えた。

そこで、本研究では開発した Slide Flex に適した触覚フィードバックの設計要件の抽出を目的とし、触覚フィードバックを付加したシステムの有効性の検証を行う。そのために、まずは走行時の操作の分析を行い、特に高齢者の操作特性を明らかにする。次に触覚的にフィードバックを行うための設計コンセプトを決定し、具体的な操作インタフェースの設計を行う。最後に、高齢者を対象に操作実験を行い、触覚フィードバックの有効性を検証する。

なお、本研究は東京大学工学部倫理審査委員会の承認のもとに実施した。また、実験においては十分な説明を行い、インフォームドコンセント、同意を得て行った。

2. スライド式操作型電動車いすの概要

図2に Slide Flex のシステム構成を示す。Slide Flex は、左右に取り付けたセンサユニット、制御用 PC、ベースとな



Fig. 1 Prototype of Slide Flex

る電動車いす (JWX-1) から構成される。センサユニットは図3に示すように長さ360mmの基板上に18の電極が配置されている静電容量式のセンサからなる。センサ入力から車両の駆動は次の方法で行われる。左右のセンサを後方から前方へ軽く触れることにより、その手の触れた位置を検出し、手の動く速度を算出する。算出した手の動く速度をスライド速度として、手動車いすの車両モデルの逆動力学から車いすを漕ぐときの駆動力に変換し、その駆動力から同じ車両順動力学を用いて車輪回転速度を算出する。それにより、これまで手動車いすをこいだ経験のある人はハンドリムをこぐ動作と同じように操作を行うことができる。

3. 操作の分析

現状でのプロトタイプ操作性の評価については、若年者が操作した際の直進・旋回・停止・スラロームでいずれも基本的な操作性が確保されていることを確認している。しかし、この車いすの対象ユーザは高齢者であり、若年者に比べて身体機能、感覚機能ともに低下していると考えられるため、高齢者においても同様の操作特性があるのか、異なる傾向を示すのかを明らかにする必要がある。そのため、まずは高齢者と若年者において、触覚フィードバックがない現状のプロトタイプで、意図に対する操作の実現度合いに違いが生じるのかを確認する実験を行う。

3-1 実験方法

(1) 方法

停止状態の車両において最も基本的な操作である直進操作、すなわち左右の手を同じ速度で動作させるように指示を出した。十分な練習を行ったうえで、操作を10回行い、操作の間には3秒間のインターバルを挟んだ。評価項目はスライド速度の左右差の時間席分 (ISVC) を用いた。これは、速度の左右差と操作時間の左右差を複合的に評価するためである。左右差が小さいほど意図した操作が可能であることを表す。また、高齢者については操作を行う上で支障が出ないレベルで身体機能が確保されていることを確かめるため、肩関節、肘関節、について関節可動域測定 (ROM) と徒手筋力検査 (MMT) を行った。

(2) 実験協力者

若年者7名 (22~24歳) は学生を対象とした公募、高齢者15名 (72.1±5.8歳) は、シルバー人材センターでの公募とした。その際、手掌や指に麻痺や痛みなどが無いことを条件とした。

3-2 結果と考察

直進操作実験の結果を図4に示す。高齢者 (A1~A15) 15名中6名においてデータ取得に不備があったため、結果から除外し、9名の結果を分析することとした。若年者のISVCの平均値は、0.017±0.006[m]であった。これらの値を比較基準値として、図4中に赤線で示す。この結果から、A1,A2,A6,A10の4名はISVCが平均値若年者平均値より大きいため、若年者よりも操作の左右差が大きいということがわかった。一方で、A3,A9,A15の3名については平均値では若年者と同等であるが、標準偏差が大きいため、時折大きな左右差が生じて安定した操作が行えないことがわかった。このように9名中7名の高齢者が若年者と比較してISVCが同等かそれ以上であることから、高齢者は若年者に比べて意図した操作を行うのが難しいということがわかった。なお、ROM, MMTの結果については、スライド操作に支障が出るレベルでの機能低下や、著しい左右差がみられた高齢者は認められなかった。

4. 設計コンセプト

4-1 操作プロセスに基づく分析

第3章で明らかにした高齢者の操作特性の変化がどのようなメカニズムに基づいて発生するのかについて、図5に示す知覚・判断・行動の操作プロセス図を用いて検討する。この図は、手の動きを感じ取ることで速度を知覚し、それをもとに判断を下して、行動へ移すというプロセスを表している。スライド操作において意図した操作ができない場合は知覚・判断・行動の3つの過程のどこかでエラーが生じていると考えることができる。本研究では、車両を停止させた状態での実験のため、直進操作においては両手を同じように動かすという単純な判断しか存在しない。そのため、エラーが生じるとすれば、知覚過程で操作者が手を動かす速度を正しく知覚できていないか、あるいは行動過程

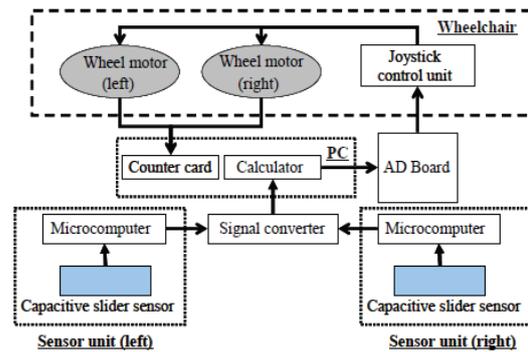


Fig. 2 System configuration of Slide Flex

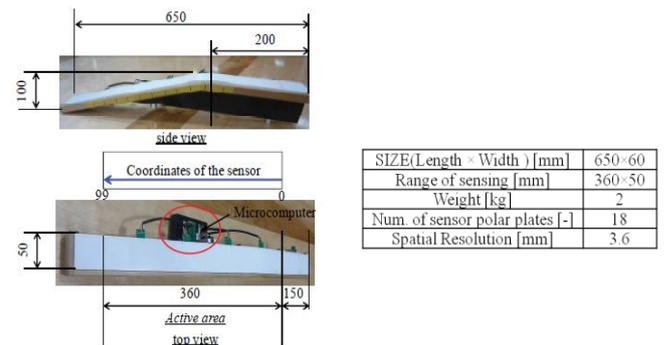


Fig. 3 Specification of slider sensor

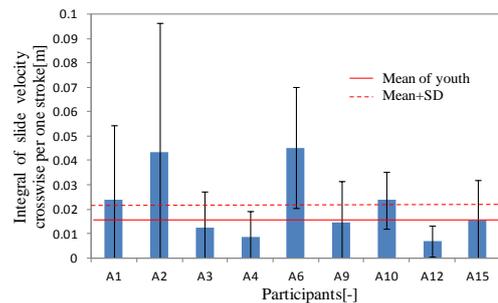


Fig. 4 Result of straight operation experiment

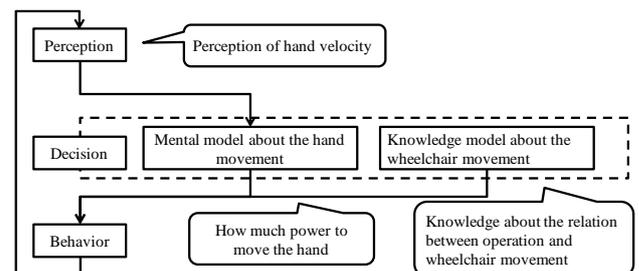


Fig. 5 Driver's operation process

で正確に知覚できていても正確に動作できていないかである。人間が動作を知覚するための感覚として、関節や筋肉に起因する位置覚というものがあるが、位置覚は加齢により低下してしまうことが報告されているため、正確な行動の前段階として知覚の低下が意図した操作に影響している可能性が考えられる。したがって、本研究では手の動作速度の知覚に着目し、速度知覚を向上させるために触覚フィードバックを付加する方法を検討する。

4-2 触覚フィードバックのコンセプト

手の速度を触覚でフィードバックする方策として、表面の位置情報を把握しやすくなる3つの方法を検討した。①センサの表面粗さを変える、②センサ表面に凹凸パターンを配置する、③センサ表面形状を変更する方法である。本研究では、①センサの表面粗さを変えた場合、手掌面への影響が大きいこと、③センサ表面形状を変更することは部材変更の必要性やセンサの設計上問題があるため、②センサ表面に凹凸パターンを配置する方法を採用した。

凹凸で速度を知覚する方法の既存事例としては、自動車の速度知覚のために道路に設けられた凹凸線がある。道路上の凹凸線は一定間隔ごとに設けられており、速度によって上下方向の振動周期が変化するため、ドライバーはその振動を知覚することで速度の知覚を行い、速度を調整することができる。この事例を参考に、センサ表面上に一定間隔で凹凸の線を設けることで速度知覚が向上し、より意図した操作に近づくのではないかと考えた。

また、高齢者は加齢により特に指先の識別能力が低下する触覚機能低下の特徴があるが、凹線と凸線の識別精度の比較実験を行った結果、凹線の方が凸線よりも識別精度が著しく低下するという報告がなされている⁽⁴⁾。

したがって、本研究では図6に示すような凸線をセンサ表面上に配置する方法を採用することとした。

5. インタフェースの設計

高齢者がセンサに触れる速度を知覚しやすい凸線を配したインタフェースを作成するにあたり、凸線の高さや凸線の間隔を決定する必要がある。

5-1 凸線の高さ

触覚識別において凸の高さが識別可否に大きく影響することが点字に関する研究において多数報告されている。これらの研究によると、高さ0.5mmというのは共通して適切であるとされており、本研究でも採用することとした。

5-2 凸線の間隔

凸線の間隔は、小さいほど速度を知覚する分解能が高くなるが、大きいほど間隔を識別しやすくなるというトレードオフの関係にあるため、操作者が間隔を識別可能な最短間隔を用いるのが最適であると言える。そのため、まずは高齢者の触覚識別能力を把握する必要があると考え、静的・動的触覚識別実験を行うこととした。

5-2-1 実験方法

(1) 方法

静的識別実験：指先の触覚機能を測定するため、どの程度の間隔の刺激を識別できるかを知るために、点を識別する実験を行った。本研究では、嶋脇らの手法を参考に⁽⁵⁾、ノギス(新潟精機、VC-07)の先端に直径0.3mm、長さ5mmの金属棒を取り付け、ノギスの自重のみで示指の指先に2点か1点の刺激を与えた。その判別が可能な最短距離を3度測定し、それらの平均を結果とした。

動的識別実験：手を動かした際に、どの程度の間隔の凸線を識別できるかを知るために、凸線を一定速度で動かした

際の識別能力を測定する。本実験では、図7左に示すような小型コンベア(ミスミ)を用いて凸線を動かし、受動的に刺激を与えることで触速度を一定にした。触速度は、想定ユーザである高齢者施設入居者の手動車いすによる平均移動速度0.2m/sを用いた。また、刺激に関しては、凸線の間隔が1つの場合と2つの場合を識別できればよいと考え、凸線が2本、もしくは3本の刺激を与え、その判別が可能な最短間隔を3度測定し、それらの平均を結果とした。

(2) 対象

第3章の実験と同様の高齢者15名である。

5-2-1 結果と考察

静的・動的触覚識別の結果を図7右に示す。これより動的識別可能な間隔には個人差があることが示された。また、静的触覚識別と動的触覚識別の結果の関係性については、外れ値であるA3を除けば相関係数が0.544であり、かなり高い相関があることが示された。よって、静的触覚識別能力を測定することで、動的触覚識別能力を推定することができると思われる。また、同じく外れ値であるA1を除けば、凸線の間隔20~54mmの間に入ることがわかった。凸線の間隔を決定する際には、操作者の識別可能な最短間隔を用いるのがよいため、20、29、43、58mmという4パターンの凸線間隔を採用し、それぞれの識別能力によって使い分けることとした。

5-3 インタフェースの実装

これらの結果をもとに凸線フィルムを作成した。凸線フィルムは、塩化ビニル製のフィルムに凸線を印刷したもので、センサ表面に張り付けることができる。図に実装したフィードバックインタフェースを示す。なお、静電容量式センサの感度や操作時の摩擦抵抗については、問題は認められなかった。

6. インタフェースの有効性評価

凸線を付したインタフェースの有効性評価のために、高齢者と若年者に対して凸線の有無と操作性についての比較を行った。凸線の間隔については、第5章の実験結果をも

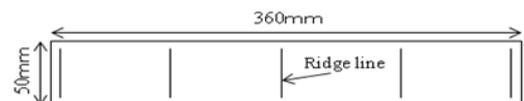


Fig. 6 The image of concept design

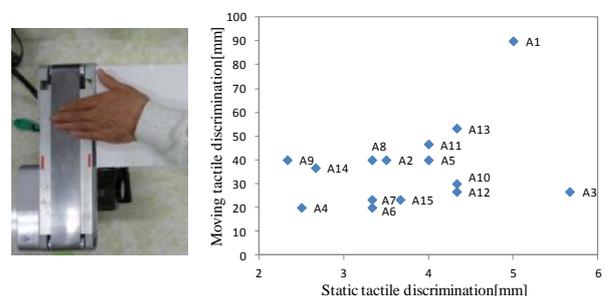


Fig. 7 Method and Result of tactile discrimination



Fig. 8 Proposed tactile feedback interface

とにそれぞれの動的触覚識別能力を上回らない最短間隔を用いることとした。

6-1. 実験方法

(1) 方法

停止状態の車両でのスライド操作を PC 内の仮想車いすの挙動に反映させる図 9 に示す走行シミュレータを作成した。操作画面はできるだけ単純で抽象化された走路、カーソルのみとした。開発環境は Visual Studio 2010 である。ホームページ型のカーソルが操作している車いすを表しており、プロトタイプと同様の車両モデルが組込まれている。現実の距離 1cm が画面上の 1 ピクセルに対応している。

実験内容としては、インタフェースに凸線がある場合とない場合で、5m 相当の直進走行を 1 回ずつ行ってもらった。なお、実験協力者に対する教示としては、ゴールするまでの時間は考慮しないこと、出来る限り理想行路に沿って走行を行うことの 2 点に注意するように伝えた。操作性を評価するための項目は、蛇行度合いを表す走行距離の超過率 $X[\%]$ と 5 段階の主観評価を用いた。X は小さいほど成績が良いことを示す。

$$X = \frac{\sum abs(v \cdot \Delta t) - 5}{5} \cdot 100 \quad (7.1)$$

ここで、車いす中心速度 $v[m/s]$ 、サンプリング時間 $\Delta t [s]$ である。

(2) 対象

本実験においても、第 3 章の実験と同様の高齢者 15 名と若年者 6 名 (22~24 歳) である。

6-2. 結果と考察

図 10 に走行距離の超過率、図 11 に主観評価の結果を示す。ただし、A5, A8 の 2 名はデータ取得に不備があったため除外してある。比較対象である若年者の結果は平均値と標準偏差で表されており、若年者の平均値+標準偏差よりも成績の良い高齢者に関しては若年者と同等の操作ができていたと判断し、今回は考慮しないこととする。

走行距離の超過率に着目すると、若年者よりも成績の低かった高齢者は 8 名であったが、そのうち A6, A9, A11, A12, A13 の 5 名において改善が見られた。このことから、触覚フィードバック付加により全体として改善される傾向であるということがわかり、操作性の向上に有効であるということが示唆された。加えて、改善が見られた高齢者は図 5 における知覚が低下していたために若年者に比べて意図した操作が難しかったということが言える。

一方で、改善が見られなかった高齢者についての考察を述べる。大きく改悪した A1 は他者に比べて走行速度が速かったこと、試行回数が一度だったことから一度の操作ミスの影響が大きかったことが原因と考えられる。触覚フィードバックなしの場合は若年者と同等の走行ができていたため、試行回数を増やすことで、若年者と同等の域に収まると考えられる。また、変化があまりなかった A2, A7 については図 5 における知覚ではなく行動においてエラーがあったことが考えられる。つまり、触覚フィードバックなしでも正確に知覚はできていたが、意図したように行動ができていなかった可能性が高い。そのため A2, A7 に関しては制御プログラム側での対策が有効であると考えられる。

次に、操作性に関する 5 段階の主観評価の結果に着目すると、触覚フィードバックにより評価が向上したのが 7 名、低下したのが 1 名であった。つまり、主観的にも触覚フィードバック付加によって操作性が向上することが示された。

7. まとめ

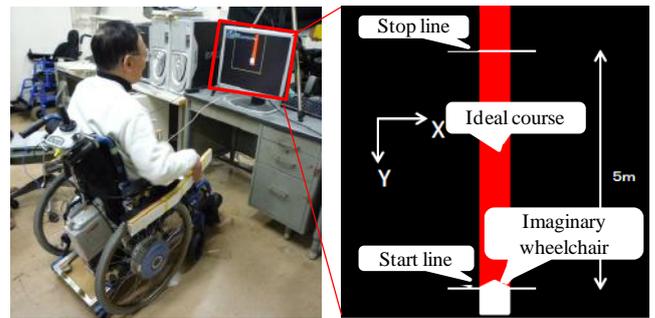


Fig. 9 Image of running simulator

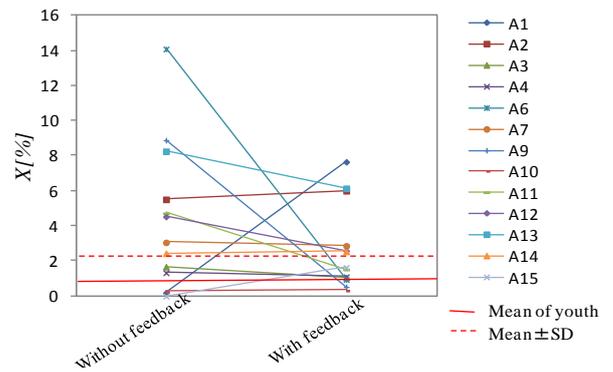


Fig. 10 Result of running experiment with the simulator

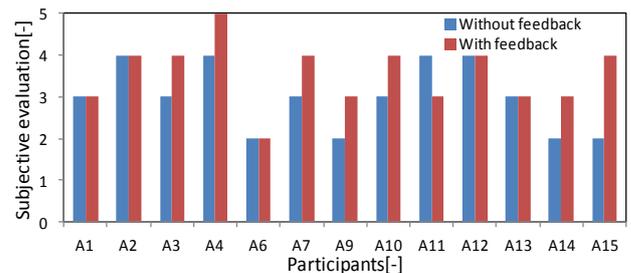


Fig.11 Result of the subjective evaluation

開発した Slide Flex に適した触覚フィードバックの設計要件を速度知覚の向上とし、自動車の速度知覚用に道路に設けられた凸線の事例を参考に、センサ表面上に等間隔で凸線を配置する方策を設計コンセプトとした。高齢者の触覚識別能力を考慮したうえでインタフェースの設計を行い、プロトタイプに実装した。高齢者を対象にインタフェースの有効性を検証する実験を行った結果、ほとんどの高齢者において走行成績と主観評価の向上が見られ、触覚フィードバック付加により操作性が向上することが示された。

参考文献

- (1) M. Nihei, N. Harue, M. Kamata, A new mobility interface for the elderly to expand their scope of activities - The SLIDE FLEX. proc. of IEEE IROS 2012, pp.341-348, 2012
- (2) 林恵美子, 鴨田真理沙, 藤本浩志, 識別しやすい点字の形状に関する研究, 人間工学, Vo.139, no.3, 2003
- (3) 石井利樹, 山本晃生, 樋口俊郎, 薄型静電アクチュエータを用いた皮膚感覚ディスプレイの開発, 電気学会論文誌E, Vol.122, No.10, 2002
- (4) 人間生活工学研究センター, 高齢者身体機能データベース
- (5) 嶋脇聡, 酒井直隆, 鈴木章之, 手掌面における静的・動的触覚の計測, 日本機械学会論文集(C編), vol.71, no.704, pp.210-214, 2005