8C35 重度身体障害者の自動車運転に関する研究 Study on Driving Performance of Severely Disabled Persons

○正 鎌田 実 (東大) 正 小竹 元基 (東大)

Minoru KAMATA, The University of Tokyo, Hongo7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo
Motoki SHINO, The University of Tokyo

Key Words: Driving, Automobile, Disabled, Drive by wire, Joystick

1. はじめに

障害で下肢麻痺の人の移動には、車いすが用いられる。しかしながら車いすでは、手動でも電動でも移動範囲は限られ、生活圏に制約がある。車いすから座席への移乗が可能で、ハンドル操作等補助装置で運転操作ができる人は、運転免許を取得することが可能で、自動車を用いて活動的な生活を送ることができる。しかしながら、頸髄損傷のような重度障害者では、移乗やハンドル操作を自身で行うことは困難で、これまでは免許取得ができず、専ら電動車いすによる移動に頼らざるを得ず、結果的に行動範囲が狭まっていた。

欧米では、車いすのままジョイスティックで運転ができ、重度障害者でも自動車利用を可能とした例があり、日本でも過去に研究開発の例があったり、輸入車を導入した例もあるものの、ジョイスティックによる運転は本質的に難しいこと、車いすのまま乗り込めて運転ができる車両構造を実現しようとすると車両が大型化すること、車両価格が膨大で容易に入手できないことなどから、容易に入手可能な機器とは言いがたい。

本研究は、重度障害者でも比較的容易に入手でき、簡単な運転操作により操縦できる自動車の実現に向けて研究開発するものである。ジョイスティック操縦に関しては、過去の研究をベースに、身体特性に制約がある人でも安全に操作可能な制御システムの開発を行い、低コストを狙った車両開発としては、原付クラスの1人乗りとしての車両レイアウトを検討し、プロト車を製作して評価を行うものであるが、本報では主として操作系制御システムの設計法について述べる。車両そのものの研究については、別にまとめる^[1]。

2. 障害者の自動車運転能力

2.1. 障害者と自動車運転

身体障害者は、障害の種類と特徴によって細かく分類できる。主なものとしては脊髄損傷、脳性麻痺、筋ジストロフィー、パーキンソン病、切断などがあるが、それぞれの分類でも、程度により残存機能は様々であり、個体差が非常に大きい。福祉機器の開発においては、この個体差に合わせる（インタフェースだけでなく、座位保持等も含めて）フィッティング作業が大きな作業となるが、自動車運転に関して細かく検討した例はほとんどない。運転免許取得の条件としては、移乗とハンドル操作の可否の点が特にクローズアップされるが、運転には、認知、判断、操作のプロセス全体の総合能力が問われ、能力が不足する場合には何らかの補助システムを援用する必要がある。例えば、静的

には操作のアプローチ等に問題がなくても、車両走行時の加速度により体幹が保持できなければ運転操作はうまくいかず、シートでの座位保持等の対応が必要となる。

2.2. 身体能力評価

本節では、身体障害者が、どれくらいの運転能力を有しているかについて、反応時間、操作範囲と操作力をもとに、評価を行う。ここでは、能力全般についての知見を得るのではなく、比較的少数の被験者でその大きな特徴を把握することを主目的としている。被験者は表1に示すように、障害者5名、健常者2名である。事前に実験内容を十分説明し、インフォームドコンセントを得た。

・反応時間：画面の変化に反応してスイッチを押す単純反応時間と、画面の内容（形状と色の違い）を認知・判断し

Table 1 Details of subjects

Subjects	Disabilities	Age	Sex
Sub.A	Spinal Cord Injury (C6)	20s	Female
Sub.B	Spinal Cord Injury (C6)	20s	Male
Sub.C	Cerebral Palsy (Slight Limbs Palsy)	20s	Male
Sub.D	Spinal Cord Injury (C6)	30s	Male
Sub.E	Spinal Cord Injury (C6)	40s	Female
Sub.F	Non-disabled	20s	Male
Sub.G	Non-disabled	40s	Male

Fig. 1 Reaction Time of each subject

て異なったスイッチを押す判断つき反応時間を測定する。手の操作ストロークや反力の影響を廃するために、ボタンのストロークは極めて小さく、反力もほとんどない状態に設定した。結果を図1に示すが、障害の種類と程度による明確な差は顕著には見られなく、この範囲において特に健常者に比べ劣っているとはいえないことがわかった。

・操作範囲と操作力:障害者向け運転操作系の設計において、どれくらいの範囲の操作が可能か、ならびにその際に反力制御はどうあるべきかが重要なポイントとなる。通常の運転において、操舵反力はSAT（セルフアライニングトルク）のように車両の状態を運転者にフィードバックする情報が重要であり、これを無くすと安定な運転が困難になると考えられるが、一方で手先の力を出せない障害者も少なくない。また、操作範囲が狭いと操作入力に対する操舵や加減速へゲインが大きくなってしまい、運転操作が不安定になりやすい。このようなことから、ジョイスティックを用いた操作量、操作力、操作速度および応答遅れの測定を、左右および前後について行うこととした。PCの画面上で動く目標物にジョイスティック操作で追従させるもので、目標物は画面上を左右・上下（操作は左右・前後に対応）に動く。操作量については、周期4秒で画面上を正弦波状に動く目標物にジョイスティックで追従させるもので、反力は与えない。操作力については、操作量試験時に操作量に比例する反力を数段階かで与え、操作状況を見る。操作速度および応答遅れについては、画面上の目標物がステップ状に変化し、それに追従させる状況を見る。純粋に手の操作能力を見るために、上体を動かさないようお願いし、測定を行った。図2,3にその例を示す。図2は被験者A、図3は被験者Eの左右方向操作力の結果であり、操作反力が存在する条件下での対象物の動きを示している。（縦軸の量は、1000という値を0.45E-3 radとして表している）これから個々の被験者の身体的状況により、操作能力が変わってくるということが分かる。

さらに、操作範囲が十分な3名の被験者に対しては、補助装置として一部で実用されている小径ハンドルを想定した測定も行った。その結果、通常のハンドルでは操作範囲が大きすぎて操作が困難状況でも、このような操作系を用意することで、操作可能であることが確認できた。

以上の結果をまとめて、今回の被験者の運転能力を整理すると表2のようになった。○は問題の無いレベル、△は現在の能力では厳しいが訓練等によっては可能性がありそうなレベル、×は対応困難のレベルを意味し、それぞれ専門家に主観判断によってランク付けした。これから、運転操作への適応能力は人によってまちまちであること、被験者Cのレベルでは操作機器側で相当な対応をしてもかなり厳しそうであるが、その他の被験者では運転の対応可能性がありそうであることがわかった。

3. 重度障害者向け操作系設計法

3.1. 障害の程度と操作系の分類

前章での検討から、従来の機械式ハンドルとレバーによる装置では、操作力が小さいと操作量を大きくして対応せざるを得ない。また、パワーステアリングのアシストを強化してほとんど反力無しとしている例もある。機械式の制約を外せば、電子制御により自由度が広がる。すなわち、通常の径のハンドルでは操作量が大きすぎて、いくら反力

Fig. 2 Results of manipulation region (Subject A)

Fig. 3 Results of manipulation region (Subject E)

Table 2 Manipulation ability of the subjects

Subjects	Disabilities	Disp.	Force	Velocity
Sub. A	Spinal Cord Injury (C6)	○	×	△
Sub. B	Spinal Cord Injury (C6)	○	△	△
Sub. C	Cerebral Palsy (Slight Limbs Palsy)	△	×	△
Sub. D	Spinal Cord Injury (C6)	○	○	○
Sub. E	Spinal Cord Injury (C6)	○	△	△
Sub. F	Non-disabled	○	○	○
Sub. G	Non-disabled	○	○	○

ゼロとしても操作不能なケースがあるが、小径ハンドル化して適切な反力制御を行うことにより対応が可能となる。最も重度の障害を有する場合、1本のジョイスティックによる操縦となるが、これまでの検討^{[2]-[11]}では操舵と前後の干渉等があり、運転にはかなりの慣れを必要とすること、車両の挙動をジョイスティック反力として運転者に知らせることにより運転しやすくすることが実現できた。しかし操作力の小さい障害者では、うまく操作ができない可能性があり、さらなる制御の高度化が望まれる。操舵と前後の干渉を取り除くには、操作部を2系統に分けるのが有効

であり、2本のジョイスティックで各方向の入力とすれば良いと考えられる。

以上のことから、本研究では、1本のジョイスティック操縦(S.J)、左右2本のジョイスティック操縦(D.J)、小径ハンドル操舵とジョイスティックによる駆動制動(S.W)の3つの方式について、制御系設計の議論を続ける。

3.2. ドライビングシミュレータ

操作系の設計を行うにあたり、実車での検討は危険が伴うため、図4に示すようなドライビングシミュレータ(以下DS)を作成し、それを用いて検討を行うこととした。DSには簡易式とモーション付の2通り用意し、被験者が操作能力を有するか判定しつつ方式やパラメータスタディを行うには簡易式を、簡易式である程度の手ごたえが得られ、総合的な運転能力を見る際にはモーション付を使用することとした。DSは安全ではあるものの、操作不能状態に陥ると無用な加速度がかかる恐れがあるために、確実な操作が可能な被験者のみモーション付での検討とする。

3.3. ジョイスティック操作系設計法検討

ジョイスティックの操作は左右操作と前後操作に分けられる。このうち前後操作については、車両の加減速を行うわけであるが、自車線からはみ出すといった安定した操縦に対する致命的な問題は起こりにくいことが指摘されている。したがって、前後方向に関してはセンタリング力に加えて、車両の加速度に比例した反力を与えればよいと考えられ、詳細な検討は、左右操作時の反力について行うことを断っておく。

左右操作に関しては、健康者を対象としては次の2つの反力を与えることで安定した操縦が可能となるという知見が得られている^{[2]-[4]}。

- ・ SAT比例反力

通常のステアリングホイールによる運転の際に、ステアリングホイールに伝わる反力(SAT)と比例した反力

- ・ 操舵遅れ比例反力

目標舵角とステアリングアクチュエータが実現する実際の実舵角の間に生じる遅れが車両の安定性を損なうことがあるため、これを防ぐための反力

しかし、本研究の対象は重度障害者であり、この方式をそのまま適用するは、操作力、操作範囲という点で問題がある。また重度障害者は、日常ジョイスティック操縦の電動車いすを利用しており、微小操作が上手である。そこで、新たな操作反力として、SAT比例反力に加え、アクチュエータの能力を超える速度でジョイスティックが操作された時のみ、その遅れに比例する反力を発生する、速度比例粘性反力という手法を提案する。この2方式を順に、T1, T2として、いくつかパラメータを調整しながら、最適な方式・数値を模索する。結果の評価に関しては、次のような評価関数を定めた。

- ・ Eval1: 目標コース1周の走行における目標コースと走行軌跡で囲まれた部分eの総面積を走行距離Lで除した値。小さいほど目標コースへの追従度が高いと判断できる。

走行安定性の評価

$$Eval_1 = \frac{\oint |e| dl}{L} \quad (1)$$

- ・ Eval2: ヨー方向の加 速度を時間積分し、通算時間で除した値。小さいほうが単位時間あたりの

Fig. 4 Moving-base driving simulator

ヨー方向の角速度の変化が小さく走行が安定していると判断できる。

操縦性の評価

$$Eval_2 = \frac{\int_0^T \left| \frac{d\theta}{dt} \right| dt}{T} \quad (2)$$

実験は、数種のコース(半径の異なるカーブの連続、車線変更、横風外乱への応答、障害物の飛び出しへの急制動、市街地模擬)を用意して、各被験者について行った。被験者ごとに数回の習熟走行を経て、最適なパラメータを設定し、データを記録する本走行実験を実施した。

まず、曲線走行時の結果の例を図5に示す。これは被験者Dのものである。反力制御の違いがコース追従性にはあまり影響しないものの、修正舵によるヨー角速度変化には大きな差があり、急激な入力変化を抑えるT2方式の方がスムーズな運転が可能であることがわかる。また、主観的评价でも、反力方式がT2の方が運転しやすいという方が多かった。したがって、反力の最大値を個別にあったものに調整した上で、反力方式としてT2を採用すると、よりジョイスティックの操縦性が向上するといえる。

次に曲線走行時の被験者6人の評価値を図6に示す。これは操作能力、運転感覚、慣れなども関係する評価値であり、訓練時間が十分でないケースが多いものの、評価値1が1.0以下であると主観評価では問題ない運転レベルと判断されることから、被験者A, C以外は走行可能、被験者A, Cも更なる操作系のチューニングと訓練により可能なレベルに到達できそうという結論をえた。

Fig. 5 Differences between T1 and T2

以上のように、運転操作が難しいとされるジョイスティック操縦も、適切な反力制御により、今回の被験者のような障害者に対して、運転可能への足がかりをえることができた。

3.4. 各操作系の評価

前節での検討から、反力方式T2を用いることで、重度障害者にもジョイスティックを適用可能であり、その操縦性が向上することが分かった。そこで、本節では、この制御方式をS.J, D.Jに適用し、小径ハンドルS.Wと併せて各操作系の比較を行う。

(1)緊急回避:片道幅4mの道路を直進中、突然、歩行者や他車が飛び出してきたことを想定する。実験では、走行距離100m付近でランダムにマークを出現させ、被験者はそのマークを認知した瞬間にブレーキ操作とレーンチェンジを同時に行うこととした。走行速度は30km/h, 50km/hの走行時の2パターンで行なった。

S.J方式は、D.J方式やS.W方式のときよりも、中央部とのずれが大きくなるが多かった。やはり、ジョイスティックの前後と左右の操作の連動には難しさが残るといえる。一方、D.J方式では、急制動状態でも的確に走行軌跡の偏差をなくす方向に操縦できた。D.J方式ならばS.W方式と同程度のレベルで危険回避ができることが分かった。

(2)外乱安定性:外乱として、走行中にランダムにアクチュエータの最高可動速度、0.1rad相当のタイヤ舵角(約5度)にまでタイヤ舵角を動作させ、その状態を動作し始めから、通算で0.5secまでの時間定常的に加算するようにして、その後の運転操作を見た。左右操作のみの評価を行なうために、走行速度は一定とし、30km/h, 50km/h, 60km/hとする。そのため、S.J方式とD.J方式の差はなくなり、D.J方式とS.W方式のみの評価を行う。結果を図7に示す。コース追従性については、おおむねS.W方式の方が成績が良く、ヨー角速度変動については、D.J方式が良いという結果になった。これは、S.W方式では通常のハンドルに比べると操作量が小さいもののD.J方式よりは大きく、修正舵のときにも大きく操作をしないとイケないで多少操作が遅れ気味になること、D.J方式では慣れてくると少ない操作で運転できるので安定するが、偏差が大きくなってから操舵をする傾向があることによると思われる。

(3)市街地走行:操作方式を総合的に評価するため、市街地走行で経路だけを指定し、被験者に自由に運転してもらった。結果を図8に示す。これは被験者Dの例であるが、速度レベルが上がると評価値は落ちるものの、いずれの操作

Fig. 6 Effect of T2 system on each subject

系でもほぼ問題ないレベルであること、S.Wが一番運転しやすいが、D.Jでもかなり安定した運転ができること、などがわかった。

4. まとめ

本研究で得られたことをまとめると、以下のようになる。

- ・重度身体障害者の操作能力の評価手法を示した。
- ・対象者の能力に応じた運転操作系の選択・設計法を示した。
- ・操作量が対応できれば、小径ハンドル操舵とジョイスティックによる駆動制動を行う操作系が操縦性に優れる。
- ・ジョイスティックで操縦を行う操作系は、SATと操舵遅れ比例粘性を付加する方式を用いることで操縦性が著しく向上する。
- ・左右2本のジョイスティックで操縦を行うと、前後・左右の干渉を避けることができ、パラメータの調整により小径ハンドル並みの操縦性を実現できる。
- ・1本のジョイスティックという操作系も操縦は難しいものの、速度を下げる、練習をするといった対策をとることで、実用は可能である。

終わりに、本研究の実験の多くは、当時学生寺島義人君によるものであることを記し、実験にご協力いただいた被験者各位に厚く御礼を申し上げて結びとする。

文献

- (1)鎌田ほか, 重度障害者の移動具に関する研究, 機講論(第11回交通物流部門大会), 2002.12(予定)
- (2)山崎, 鎌田, 操縦桿による車両運動制御の研究(第一報), 自技論, 29-3, pp117-122, 1998
- (3)山崎, 鎌田, 「同(第二報)」, 自技論, 31-1, pp75-81, 2000
- (4)山崎, 鎌田, 「同(第三報)」, 自技論, 31-1, pp83-89, 2000

Fig. 7 Evaluate of disturbance stability

Fig. 8 Comparison of Different System (Subject D)