

ドライバモデルを用いたリーン機構を有する パーソナルモビリティビークルのドライバ特性の検討

日大生産工(院) ○松田 明子 日大生産工 景山 一郎 日大生産工 栗谷川 幸代
名古屋大 原口 哲之理 大阪産業大 金子 哲也
IPG Automotive(株) 小林 祐範 IPG Automotive(株) 村山 哲也

1. まえがき

環境問題や交通状況の観点から、小型で手軽なあたらしい移動手段としてPersonal Mobility Vehicle (以下, PMV)が期待され、国内外問わず研究・開発が進められている。PMVは、小型化実現のため車幅は全高に比べて狭くなり、旋回時に横転の危険性が増大する。この対策案として、三輪でありながら自動二輪車同様に旋回中内側に倒れこむ機構（以下、リーン機構）を有するPMVが有効であると報告されている⁽¹⁾。このような特性を有する車両は現状市販されておらずまだ実証実験の段階であり、人の感性による評価・判断が求められる。しかし、リーン機構を有するPMVにおいてドライバの主観評価を用いた運転のしやすさに関する研究例は少ない。また、車両の乗りやすさを評価する際ドライバは、車両の特性自体を評価しているのではなく、自身が思い描く車両挙動になるよう操作量を変えながら、得られる操作性及び車両挙動を評価していると考えられる。そのため、人間・自動車系の観点からリーン機構を有するPMVのドライバ感覚と車両挙動の関連付けを行った評価手法の検討が必要となる。そこで、本研究ではPMVを模擬した大型5面立体視没入型ドライビングシミュレータ（以下、DS）⁽²⁾⁽³⁾上で実験を行い、ドライバ個々の運転行動について解析を行う。ドライバの運転行動の表現の一つとしてドライバモデルの構築を行うことでドライバによる運転行動の入出力の関係の明確化を図りドライバの主観評価に影響を及ぼす行動要素を検討する。本報告では、フィードフォワード操舵角を構成する要素について検討を行った。また、フィードフォワード成分を主運動動作としているドライバの特性把握を行った。

なお、本研究は日本大学生産工学部「人を対象とする研究倫理審査委員会」（承認番号 S2017-012）の承認を得て実施した。

2. DS実験

リーン機構を有するPMVは市販されていないため、PMVを模擬したドライビングシミュレータ（以下DS）実験により運転動作及び車両挙動の取得を行った。実験装置は、図1に示す名古屋大学ナショナル・イノベーション・コンプレックス(NIC)のDSを用いた。なお、DSは丸ハンドルによる操舵入力となり四輪車同様の操作方法である。車両特性はDSの車両シミュレーションシステムであるIPG Automotive社のCarMakerにより再現し、旋回特性の把握を行うためステア特性に着目し設定を行った。本研究の車両は、二輪車と同様の機構を有するためタイヤ特性変更により横すべり特

性一定のままステア特性を大きく変更した諸元を用いた。理論的に二輪車に近い車両特性Steer2を基準と、そこから前後に振ったSteer1, Steer3の3つの車両特性を設定した。これらの車両のスタビリティファクタ K_δ と横すべり係数 K_B との関係を図2に示す。実験条件は、慣れによる影響を考慮するため基準となるSteer2を間に挟むように、Steer2-1・Steer1・Steer2-2・Steer3・Steer2-3の順で行い、これらの順や合計本数は実験参加者に伏せた状態で行った。本報告では、代表値としてSteer1・Steer2-2・Steer3の解析を行う。ここで、各車両特性における応答性の把握を行った。図3に30[deg]でステップ入力をした際のロール角、ロールレイト、ヨーレイトの車両応答を示す。なお、応答はISO座標系を用いて示している。これらの特性の車両をドライバは自身が思い描いた挙動となるように操作入力を変えながら運転していると考えられる。実験コースは、様々なカーブを有する日本平パークウェイの下りを模擬したコースとした。なお、本研究では横方向の制御の検討を行うため、2次元平面状と仮定し解析を行う。実験終了後、「車両の乗りやすさ」と操作性に関する計13項目の主観評価を得た。また、ドライバの個人特性の把握を行うため、人間生活工学研究センター(HQL)による運転スタイルチェックシート(Driving Style Questionnaire 以下, DSQ)⁽⁴⁾及び、運転負担感受性チェックシート(Workload Sensitivity, Questionnaire 以下, WSQ)⁽⁵⁾の回答を事前に得た。実験参加者は、インフォームドコンセントを得た普通自動車運転免許を取得している20~40代男女12名であり、実験参加者A~Lとする。



図1 ドライビングシミュレータ

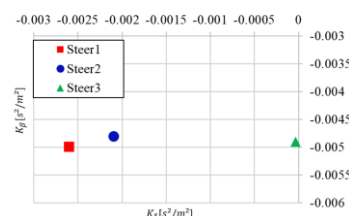


図2 車両特性

Study on Driver Characteristics of Personal Mobility Vehicle with Lean Mechanism using Driver Model

Meiko MATSUDA, Ichiro KAGEYAMA, Yukiyo KURIYAGAWA, Tetsunori HARAGUCHI,
Tetsuya KANEKO, Masanori KOBAYASHI and Tetsuya MURAYAMA

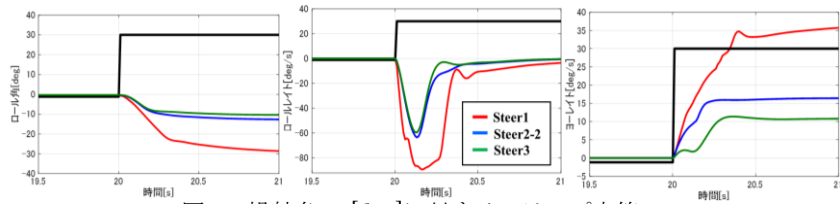


図3 操舵角 30[deg]に対するステップ応答

3. 運転行動

通常運転行動は、前方の道路情報により決定されるフィードフォワード（以下、FF）成分とフィードバック（以下、FB）成分による運動状態に対し補正を行うフィードバック（以下、FB）成分で記述される⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこでまずFF操舵及びFB操舵の表現を行う。本研究の車両は四輪車と同様の操作方法である。加えて、ドライバの運転行動明確化のため入力と出力の関係を明確化する必要がある。そのため、できるだけ簡易的なモデルの構築を目指す必要がある。さらに、本研究のDSのロール角は比較的小さいと仮定し本研究のドライバモデルは四輪車の線形モデルをベースに構築する。

3.1. フィードフォワードモデル

一般的に、操舵角は前方のコース曲率に高い相関を持つとされる⁷⁾。これは、前方の曲率を基に操舵角の決定を行っているためと考えられる。曲率情報を取得してから、決定した操舵角を行うまでのずれ時間を等価予見時間とする。等価予見時間は実際にドライバが前方を見ている点（前方注視点）ではなく、曲率情報によりドライバが車両に対して操舵をきり始めなければならない時間を示している。曲率とDS走行で得られた操舵角において相互相関関数を用いて解析を行った。相互相関関数は曲率に対して操舵角の波形を1データ（0.01秒）ずつずらした際のピーク時の確認を行う。この時、曲率と操舵角のずれ時間0[s]の時から前方の曲率に対する操舵角の相関係数が高い場合この進み時間を等価予見時間とし、車両軌跡に対する操舵角の相関係数が高い場合この負のずれ時間を遅れ時間と定義し算出した。実験参加者12名分のずれ時間を図4に示す。*は、各実験参加者が主観評価項目5番『車両の乗りやすさ』で最も乗りやすいと回答した車両を示している。図より、ずれ時間が正となる運転行動は、前方コース形状より操舵を決定しているため、主制御動作がFF成分と考えられる。一方で、ずれ時間が負となる運転行動は、車両軌跡と相関が高いため主制御動作がFB成分である。本研究の実験参加者の主制御動作が①すべての車両でFF成分の実験参加者A,B,D,J, ②最も乗りやすい車両がFF成分の実験参加者E,G,H, ③最も乗りやすい車両がFB成分の実験参加者I,K, ④すべての車両でFB成分の実験参加者C,F,Lに分けた。本報告では、上記分類①及び分類②の計7名の運転行動解析を行う。

相互相関係数が最も高くなる時の値が7名すべてで0.97と非常に高くなった。そこで、このときの傾きを操舵ゲインとし、等価予見時間の位置における曲率と操舵ゲインの掛け合わせでFF操舵を算出する⁷⁾。算出したFF操舵とDS走行で得た操舵角との関係を図5に示す。図より、前方曲率により算出したFF操舵によりドライバの操舵主成分が表示されていることがわかる。

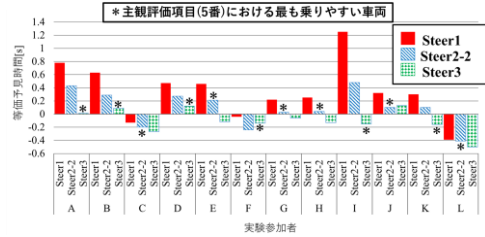


図4 等価予見時間

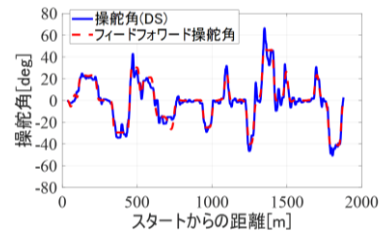


図5 FF操舵角

3.2. フィードフォワードモデルを構成する要素

前節で述べた様に、FF操舵を構成する要素は、操舵ゲインと等価予見時間における曲率である。ここで、曲率は道路形状により決定されるため車両やドライバに左右されない。そこで、操舵ゲインと等価予見時間の関係図を図6に示す。図より、操舵ゲインはドライバ間の差がなく車両特性に依存していることがわかる。ステップ応答のゲインが小さい車両ほど、ドライバは操舵ゲインで補償しており、操舵ゲインが大きいほど等価予見時間を短くしていることがわかる。さらに、等価予見時間はドライバや車両により差がみられる。これは、等価予見時間を変化させることでドライバ-自動車系の応答特性が変化することから、各ドライバののぞむ特性に近づけているものと考えられる。等価予見時間が操舵を始める時間であり、等価予見時間が長いほど操舵を早く行わないと思い描く車両挙動とならない車両であり、等価予見時間が短いほどぎりぎりまで操舵を行っても思い描く車両挙動が実現できる車両であることを意味する。つまり、Steer3は等価予見時間が短いことから、ドライバによって応答性の向上を行うことができる車両であると考えられる。一方で、Steer1はすべての実験参加者で3車両の内最も等価予見時間が長くなっているもののドライバ間で大きな差がみられた。

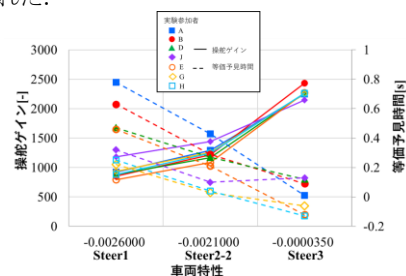


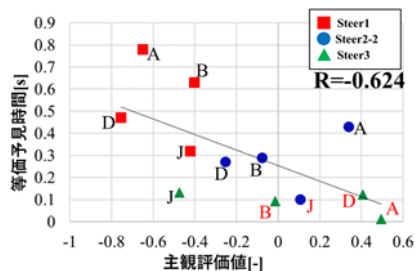
図6 FF成分の構成要素

3.3.主観評価

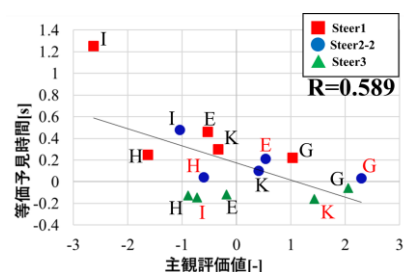
主観評価項目5番の『車両の乗りやすさ』に関する実験参加者12名の評価値の標準化を行った。標準化を行った主観評価値は正であるほど乗りやすく、負であるほど乗りにくいと評価したことを示す。なお、赤字で示す車両は各実験参加者において最も乗りやすいと評価している車両である。図7(a)に①すべての車両特性でFF成分を主制御動作としている実験参加者の評価値に対する等価予見時間の関係を示す。図より、主観評価に対する等価予見時間の相関係数は-0.642と相関があり、等価予見時間がドライバの乗りやすさの評価につながることを示唆される。さらに、前節で述べた様に等価予見時間とは操舵を始めなければならない時間である。等価予見時間が短い車両を選んでいことからドライバは自身の操縦によって応答性の向上を図れる車両を好んでいることがわかる。

また、図7(b)に車両により主制御動作が異なるドライバにおける評価値に対する等価予見時間の関係を示す。内実験参加者E,G,Hが②最も乗りやすい車両の主制御操作がFF成分となる実験参加者。一方で、実験参加者I,Kは③最も乗りやすい車両の主制御操作がFB成分となる実験参加者である。図より、相関係数が0.589と相関があることがわかる。しかし、好む制御動作が異なることから等価予見時間の長さ以外の評価が関係していると考えられる。本報告で着目した分類②では、等価予見時間が正となる2車両の内等価予見時間が短い車両特性を最も乗りやすいと評価している。

以上より、乗りやすさの評価においてここで採用したドライバ7名は、等価予見時間を短くして自身の操縦により応答性を向上できる車両を好んでいることが明らかになった。また、乗りやすいと評価した車両特性がSteer2-2またはSteer3で分かれることからこの特性付近に位置する車両特性が受容されると考えられる。



(a)3車両の主制御動作がFF成分となる参加者



(b)最も乗りやすい車両がFF成分となる参加者

図7 等価予見時間と主観評価の関係

4. ドライバ特性

ここで、本研究で選択した7名におけるドライバ特性の把握を行う。ドライバ特性は、HQLにより一般公

開されているDSQとWSQの2つのチェックシートを用いて把握を行った。DSQは「1: 運転スキルへの自信の有無」「2: 運転に対する消極性」「3: せっかちな運転傾向」「4: 几帳面な運転傾向」「5: 信号に対する事前準備的な運転」「6: ステイタスシンボルとしての車」「7: 不安定な運転傾向」「8: 心配性的傾向」の8尺度で構成され、18質問の回答から各尺度のスコアが決定される。なお、各尺度のスコアが高いほど運転態度や考え方が項目にあてはまることを示す。一方で、WSQは「1: 交通状況の把握」「2: 道路環境把握」「3: 運転への集中阻害」「4: 身体的活動度の低下」「5: 運転ペース阻害」「6: 身体的苦痛」「7: 経路把握や探索」「8: 車内環境」「9: 制御操作」「10: 運転姿勢」の10尺度で構成され、38個の質問の回答からスコアが決定される。なお、スコアが高いほど各尺度に対する負担度の感受性が高い事を示す。2つのチェックシートに対しどちらにドライバの特性差が現れるか検討を行うため、運転スタイル及び負担感受性の大きなドライバ特性傾向の確認を行った。まず、DSQでは8尺度、WSQでは10尺度の値を用いて各実験参加者のベクトルを算出した。算出した値を用いてWSQのベクトルに対するDSQのベクトルの関係図を図8に示す。図において選択したドライバである①すべての車両特性においてFF成分を主制御動作としている実験参加者4名と②主観評価項目5番で最も乗りやすい車両の主制御操作がFF成分となる実験参加者をFF-group。一方で、③主観評価項目5番で最も乗りやすい車両の主制御操作がFB成分となる実験参加者と④すべての車両特性でFB成分となった実験参加者をFB-groupとして示す。図より、DSQではドライバごとの差は見られなかったのに対し、WSQではドライバでの差がみられた。つまり、等価予見時間の違いはWSQの項目によりドライバの特性差がみられる可能性がある。また、等価予見時間を用いて選択した7名の実験参加者を見てみると図において値9を境に左側に配置されていることがわかる。つまり、WSQの項目において本実験の実験参加者の中では負担度の感受性が低い側に分類されているドライバであることが分かった。本研究のコースは様々なカーブを有し、対象となる車両が新しい感覚の車であることからWSQの尺度の内、情報取り込みの煩雑さに関する「1: 交通状況把握」と車外環境(道路、天候、明るさ)の変化、複雑さ、悪さに関する「2: 道路環境把握」および運転操作の煩雑さに関する「9: 制御操作」にドライバ特性差が現れると考えられる。そこで、3尺度についての各実験参加者の位置づけを図9に示す。図よりFF-groupとFB-groupのドライバは実験参加者Kの「9: 制御操作」においてはFF-groupに近いものの、2群に分けられることがわかる。FFが主制御動作とするドライバであるFF-groupは全国平均に比べ負担感受性が低いドライバである。一方、FBが主制御動作とするドライバは全国平均よりも図中右上に位置する負担感受性が高い分類であることがわかる。「1: 交通状況把握」「2: 道路環境把握」の感受性が高いと道路構造が分かりやすい道を好む傾向があり、さらに「9: 制御操作」の感受性が高いドライバはよく知っている道への嗜好が強いとされている⁶⁾。つまり、FBを主制御動作としているドライバは、複雑な道路環境への負担を感じやすいドライバ群であると示唆される。

また、ドライバの普通自動車運転免許および普通自動車二輪車免許の取得年数、運転頻度を表1に示す。通常四輪車を運転するドライバはより遠くの前方向コース情報を基に操舵角を決定するとされている。しかし、表よりFF-groupは普通自動車免許取得年数が3年11か月以下である比較的熟練度が低いドライバであるのに対し、FB-groupは実験参加者Fを除き免許取得年数5年以上と熟練度が高いドライバであることがわかる。これは、FB-groupのドライバは長年乗り慣れている四輪車と異なりリーン機構が加わることでコースに対し適切な挙動とならず修正制御動作を多く行った可能性がある。WSQにおいてカーブが多い複雑なコースへの負担感受性が高く、「9:制御操作」においては細かいハンドル操作や速度調節が必要な道への負担感受性が高まっている⁽⁵⁾ため、カーブの多い本実験のコースでは前方のコース情報よりも操作性に意識を多く取られたと考えられる。そこで、今後FB-groupのモデル構築を行い、重要視される車両挙動の明確化を行う必要がある。

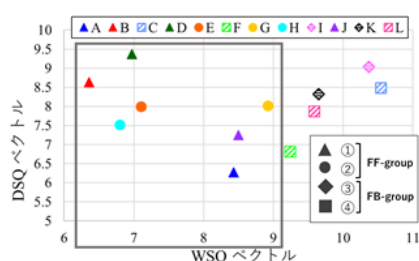


図8 ドライバ特性の傾向

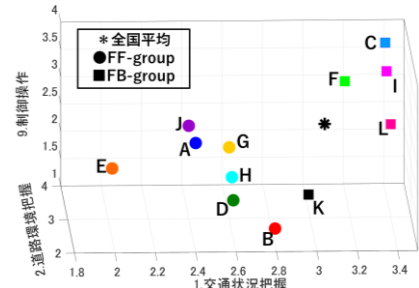


図9 WSQ (1, 2, 9) におけるドライバ傾向

表1 免許取得年数および運転頻度

表1 免許取得年数・運転頻度・運転歴別									
			四輪		普通自動車二輪		二輪		
参加者	性別	年齢	取得後年数	運転頻度	取得後年数	運転頻度	運転頻度	運転年数	
A	男性	24	2年9か月	年10回	1年5か月	週1回	-	-	① ② FF-group
B	男性	23	3年11か月	週3回	-	-	-	-	
C	女性	43	25年2か月	週2回	-	-	-	-	
D	男性	24	7か月	月1回	-	-	-	-	③ ④ FB-group
E	男性	22	3年4か月	月3回	1年10か月	週6回	-	-	
F	男性	22	2年10か月	月1回	-	-	-	-	
G	男性	21	2年3か月	週4回	-	-	-	-	
H	男性	23	3年5か月	週2回	4年9か月	月2回	週5回	8か月	
I	女性	27	5年6か月	月1回	-	-	-	-	
J	男性	22	3年11か月	週3回	3年5か月	週2回	週5回	3年11か月	
K	男性	24	5年10か月	月1回	5年5か月	週2回	-	-	
L	男性	33	12年5か月	週1回	-	-	-	-	

5. まとめ

本研究では、リーン機構を有するPMVの人間-自動車系の観点でみた評価手法の検討を行うため、ドライバモデルを用いた検討を行った。その結果、リーン機構を有するPMVにおいてFF成分を主制御動作としているドライバと、FB成分を主運転動作としているドライバがあり、本報告では、FF成分を主制御動作としているドライバ7名について検討を行った。その結果、等

価予見時間は主観評価と相関がみられ、等価予見時間がドライバの乗りやすさの評価につながる事が示唆された。さらに、等価予見時間が前方曲率により決定した操舵を行い始める時間であること、さらにすべての車両でFF成分が主制御動作となるドライバは等価予見時間が短い車両を選んでいることからドライバ自身の手によって応答性の向上を図れる車両特性を好んでいると考えられる。また、この時の車両特性は、Steer2-2, Steer3であることから二輪車に近いオーバーステア特性から弱オーバーステア特性の間の特性が受容されることが明らかとなった。そこで、今後それらの弱オーバーステア付近の車両特性について検討を行う必要がある。

また、これらの主制御動作に基づいたドライバの特性差は、WSQによりみられた。WSQの内、「1:交通状況把握」「2:道路環境把握」「9:制御操作」においてFF成分が主制御動作とするドライバは全国平均に比べ負担感受性が低いドライバである。一方で、FB成分が主制御動作とするドライバは全国平均よりも負担感受性が高い分類であり、複雑な道路環境への負担を感じやすいドライバ群であり分類できることが明らかとなった。

さらに、免許取得年数を見ていくと熟練度が高いドライバがFB成分を主制御動作としていることが分かった。これは、長年乗り慣れている四輪車に対しリーン機構が加わることで修正要素が多く入る制御動作となる可能性がある。加えて、細かいハンドル操作や速度調節が必要な道への負担感受性が高いドライバ群であることから、カーブの多い本実験のコースでは前方のコース情報よりも操作性に意識を多く取られたと考えられる。そこで、今後FB成分を主制御動作としているドライバのモデル化を行い構成要素について検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 景山一郎他,キャンバ角制御を用いたパーソナルモビリティの運動特性に関する基礎研究,自動車技術会学術講演会予稿集, No.115-12, p.1-6 (2012), 20125719
- 2) 玄葉誠他,大型5面立体視ドライビングシミュレータによる人間自動車系の研究(第1報),自動車技術会論文集, vol.47 No.3, p.783-788(2016), 20164345
- 3) 原口哲之理他,大型5面没入型ドライビングシミュレータによる内傾型パーソナルモビリティビークル研究”,自動車技術会論文集, vol.48 No.3, p.693-698 (2017)
- 4) 石橋基範他,“運転スタイルの指標化と追従運転行動”,自動車技術会論文集, vol.39 No.1, p.121-126 (2008), 20084065
- 5) 石橋基範他,ドライバの運転負担感受性の指標化と経路選択嗜好分析への応用”,自動車技術会論文集, vol.39 No.5, p.169-174
- 6) 近藤政市,自動車の操舵と運動間に存在する基礎的関係について,自動車技術会論文集, No. 5, p.40-43(1958), 586007
- 7) 景山一郎他,高度運転支援システムに向けたドライバモデル構築に関する研究,自動車技術会論文集, vol.48 No.2, p. 431-437(2017), 20174218