

## 操舵系形状変化に伴うドライバ操舵特性への影響

日大生産工(院) ○千葉 橋平 日大生産工 風間 恵介  
日大生産工 丸茂 喜高

### 1. 緒言

人が自動車を運転する際「認知・判断・操作」という作業を同時に行っている。注意資源の分配モデルによれば、人は限られた量の注意資源を持ち、必要に応じて複数の作業に分配している<sup>1)</sup>。交差点や狭い道、駐車時などは、すれ違いや歩行者への注意など複雑な交通環境によって処理資源が限界を超えヒューマンエラーが発生しやすくなり、事故のリスクが高まる。走行頻度にもよると思われるが、実際に乗用車・貨物車の交通事故は約55%が60km/h未満で起きており、低速走行領域での事故が多い<sup>2)</sup>

低速での右左折や駐車等の狭所旋回では、大きな操舵角を適切に調節して目標軌道に沿って走行する必要がある。その際に適切な操舵角を決めるための精神的負担や、実際に操舵するための肉体的負担が大きい。すなわち「操作」に伴って消費される注意資源が多くなる。その結果、周囲を観察して正しく認知・判断を行うための資源分配が少なくなり、多くの事故が発生しているとも考えられる。このような課題を解決するためには、直感的に、かつ簡単に運転

(操作) できる工夫が必要であり、そのような工夫は事故件数の低減につながると考える。従来はなるべく小さな力で操舵できるように、操舵角をギアで減速して前輪を転舵する機構が長期にわたり継承されてきた。その結果、低速では大きな操舵角が必要になっており、それが業界基準になっている。

現代においてはパワーステアリングやステアバイワイヤなどを用いれば、小さな操舵力で前輪を大きく転舵することは極めて簡単に実現できる。しかし、従来の丸形ステアリング(以下、丸ハンドル)で単純にギア比率を減らすと、低速では操舵角の高周波成分で横加速度が大きく発生して乗り心地を損なうだけでなく、運転しづらいことが知られている。この課題に対して、ステアバイワイヤを用いた制御での応答補正をかける手法などが提案されている<sup>3)</sup>。

筆者らは、操作の形状や操作方向に着目し、バー形状の操作系(以下、バーハンドル)について検討してきた。バーハンドルの操舵系では、ギア比(操舵角/前輪舵角)をタイヤ舵角と同じ1の比率にしても、過敏な応答が起きづらい上、運転経験が少ないドライバでも、練習なく乗りこなせる事例が確認できている<sup>4)</sup>。これは目標地点に向かう方向に操舵角を決めることで直感的な運転が実現されたためと考えている。北原らは、バーハンドルを具備した実験車で、運転時の精神的余裕や制御成績の向上を確認した<sup>5)</sup>。この研究では同一のドライバでも操作端の形状に依ってドライバモデルが変化することが示されているが、そのメカニズムについては明らかになっていない。本研究では、ドライバが目標軌道に追従するときの操舵をフィードフォワード成分とフィードバック成分に分解しその割合を評価することで操作端の形状や操作方向でドライバモデルが変化の様子を調査する。

### 2. ドライバ特性について

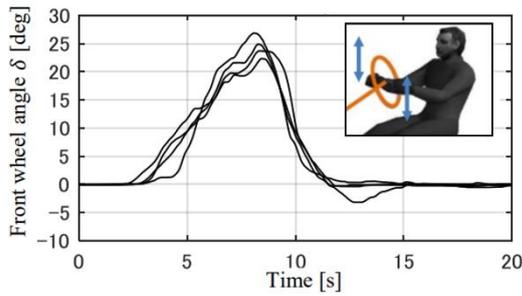
過去のバーハンドルでの実験データ<sup>5)</sup>を改めてFig.1に示す。実験参加者全員が丸ハンドルでは三角波状の操舵パターンになり、バーハンドルでは台形状になることが確認できる。言い換えると丸ハンドルは切り増し、切り戻しの操舵状態が続くのに対し、バーハンドルでは途中で操舵速度が小さい保舵状態が出現する。バーハンドルで保舵状態が出現する理由は、将来の目標コースに対して適切な操舵角がわかって、車両の動きを見ながら操舵したためであるという仮説を立てた。

そこで、事前に大まかに操舵角を決定するフィードフォワード成分と、車両軌道と目標コースのずれを修正するフィードバック成分に大別して検討を進めることにした。頻繁に走行する道路ではフィードフォワード成分でプログラマ的に操舵し、初めて走行する複雑なコーナ

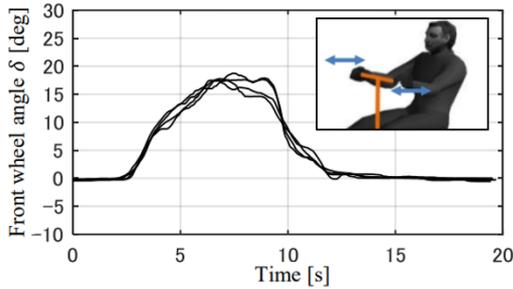
---

Effects of Steering Device Shape on Driver's Steering Characteristics

Kippe CHIBA, Keisuke KAZAMA and Yoshitaka MARUMO



(a) Case of operation by wheel type steering system



(b) Case of operation by bar type steering system

Fig. 1 Front wheel angle at an intersection<sup>5)</sup>

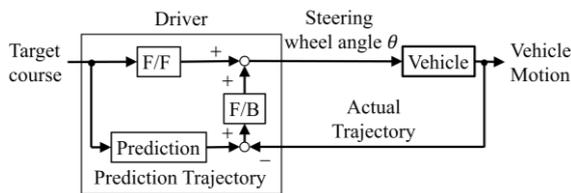


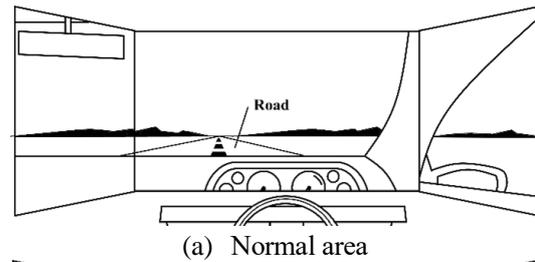
Fig. 2 Trajectory prediction model

ではフィードバック成分が多くなることは多くのドライバーが日常的に経験している。ドライバーの操舵モデルの概略図を Fig. 2 に示す。

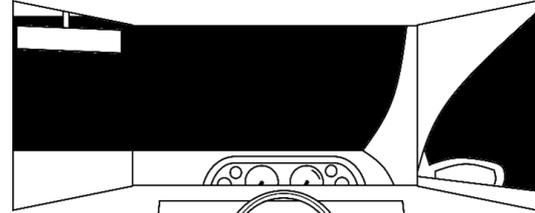
まず、目標となる車両走行軌跡に沿って走行するために必要な前輪転舵角  $\delta_{tgt}$  と実際の操舵角の差を余剰前輪転舵角と定義し、その総和  $\delta_{ext}$  でフィードバック成分の大きさを評価することにした。計算式を式 (1) に示す。

$$\delta_{ext} = \int |\delta| dt - \int \delta_{tgt} dt \quad (1)$$

しかし、この方法ではフィードバック成分を評価できるが、フィードフォワード成分の評価は難しい。そこでフィードフォワードの評価には、運転操作中に映像を消失(以下、視覚遮断)させてドライバーにはその時点でのイメージに頼った操作を要求する環境を設定した。概要図を Fig. 3 に示す。視覚遮断区間では操作形状の違いによるドライバーモデル変化の評価を行う。



(a) Normal area



(b) Visual occlusion area

Fig. 3 Overview of visual Occlusion

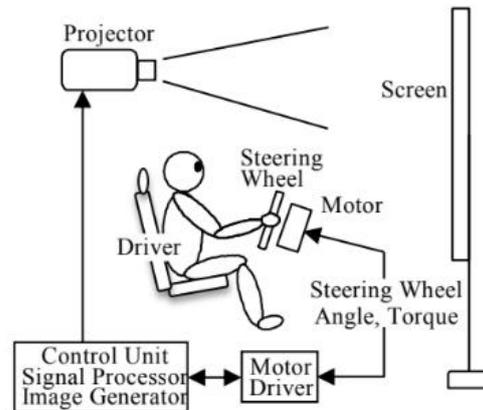


Fig. 4 Driving simulator

### 3. ドライビングシミュレータ概要

実験で使用したドライビングシミュレータ(以下、DS)は、運転席のみを有する定置型である。DSの概要を Fig. 4 に示す。ドライバーの操舵角に応じて車両挙動が計算され、視覚情報と操舵反力がドライバーに与えられる。視覚情報はシミュレータの前方に設置した映像スクリーンに投影される。アイポイントからスクリーンまでの距離は 1.1m、水平画角 57.0deg、垂直画角 43.0deg である。実験では一定速で操舵のみを行うためペダル操作は行わないが、実車同様のペダルは設置されている。シート位置は実験参加者が適宜調節できるようにした。

### 4. 丸ハンドルとバーハンドルの比較

丸ハンドルとバーハンドルの比較実験を行った。丸ハンドルのギア比率は 15.9 とし、バーハンドルは 1 とした。操舵反力はギアに応じて変更したが、前輪転舵角に対する車両モデル

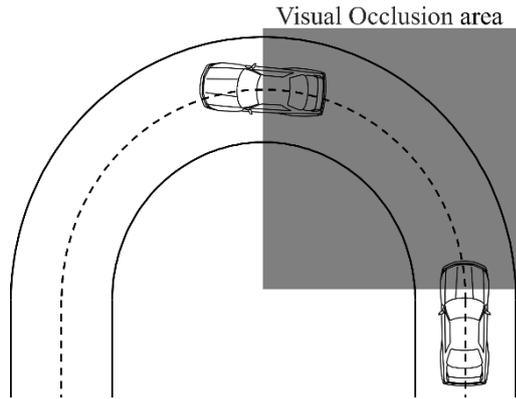


Fig. 5 Visual Occlusion Area

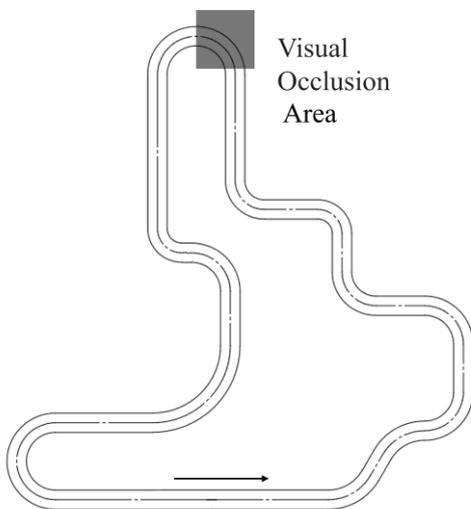


Fig. 6 Course layout

は同一とした。予備実験結果を踏まえて、視覚遮断の開始タイミングを Fig. 5 に示す曲率の開始地点とした。また、視覚遮断領域の目標走行軌跡半径は 8m とし、視覚遮断時間を増加させた。コースレイアウトについては、視覚遮断が起きる領域を想定しづらくすることや、慣熟走行のしやすさの観点から様々な曲率のコーナを組み合わせたレイアウトを作成した。コース幅は 4m とし、コース上の中央には点線で目標走行軌跡を描画した。Fig. 6 にコースレイアウトを示す。車速は 10km/h 一定でペダル操作は行わない。実験参加者には運転免許取得後にほとんど公道で走行経験がない初心者ドライバーと、毎日の通勤で車を利用する一般ドライバーにインフォームドコンセントを経て実験を実施した。視覚遮断領域は固定だが、「どこかで視覚遮断が起きる」「視覚遮断中も目標走行軌跡に沿うように走るように」と伝えた。評価には、余剰前輪操舵角の総和  $\delta_{ext}$  を用いた。

比較実験によって得られた余剰操舵角の総和  $\delta_{ext}$  の値を Fig. 7 に示す。次に、Fig. 8(a) に初心者の前輪転舵角データを、(b) に走行軌跡を示す。また、Fig. 9 に一般ドライバーのデータを同様に示す。Fig. 8(a) の転舵角データは、視覚遮断の開始タイミングでデータを揃えその 3 秒手前のデータから表示している。また、太線で表した部分が、視覚遮断中のデータである。黒い破線で示した転舵角を理想の転舵角とし、その転舵角で走行した軌跡も示している。

初心者の操舵に注目すると、視覚遮断中の操舵角に違いが見られる。転舵角速度はおおむね変わらないが、赤線で示す丸ハンドルではどれだけ切り増してよいか分からず、必要以上に切り込んでしまい大きく修正が必要となっていることが見て取れる。また、走行軌跡を見ても丸ハンドルでは大きく逸脱してしまっている。一方、青線で示すバーハンドルでは、切り増しの量が明らかに少なく、修正操舵がほぼ発生しない。最大前輪転舵角が丸ハンドルでは 25.6deg であるのに対し、バーハンドルでは 21.5deg に減少している。さらに、最大転舵角付近の舵角の変化も緩やかになっており、より余裕を持った操舵ができていることが分かる。

また、一般ドライバーであっても、転舵角を一定に保つ保舵の時間が増え、修正操舵も減っている。最大転舵角の値も丸ハンドルで 21.0deg、バーハンドルで 19.5deg とこちらも減少している。軌跡は大きな変化が見られなかった。次に、余剰操舵角をみると、両ドライバーともに、バーハンドルにおいては余剰操舵角が低減していた。運転経験がほぼないにも関わらず、一般者の丸ハンドル以上の結果を示した。これより、バーハンドルは、直観的な走行軌跡予測が可能であり、一般者と同等以上のフィードフォワード要素を練習なしで獲得できているのではないかと考えられる。

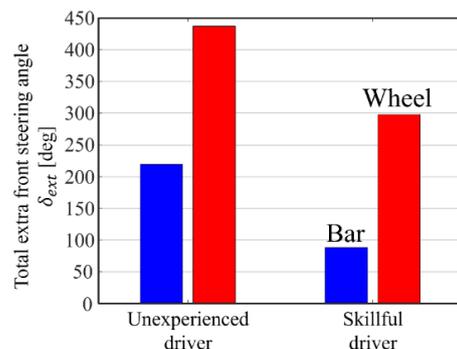
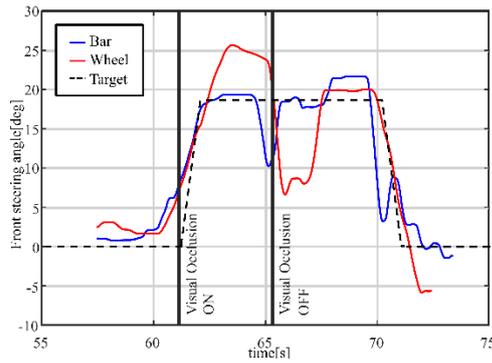
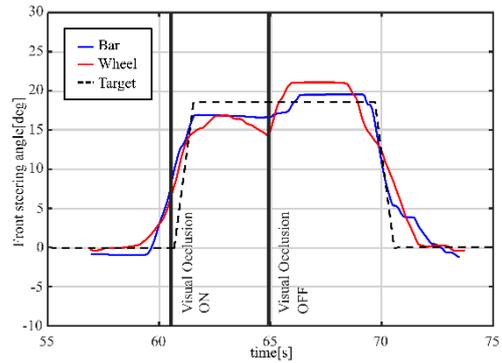


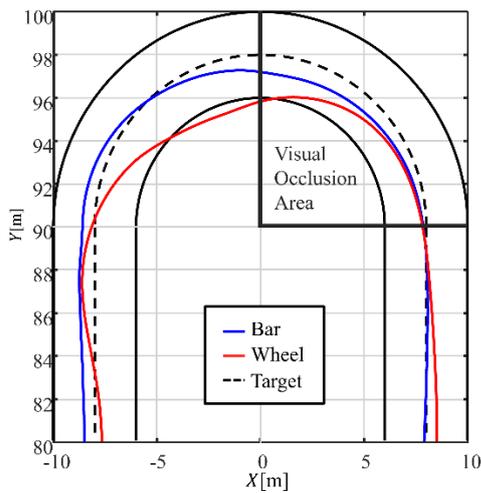
Fig. 7 Total extra front steering angle



(a) Front steering angle

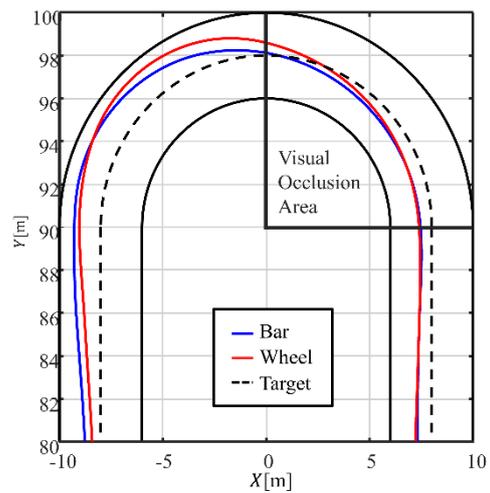


(a) Front steering angle



(b) Trajectory

Fig. 8 Unexperienced driver



(b) Trajectory

Fig. 9 Skillful driver

## 5. 結語

本研究では、ドライバーが目標軌道に追従するときの操舵について考察した。また、考察からフィードフォワード要素とフィードバック要素の有無について議論するために、視界を遮る視覚遮断を用いた実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・視覚遮断を開始するタイミングを決定するため予備実験を行った。コーナ曲率開始地点から離れるほど、コースから逸脱することを確認した。これより、ステアリングを切り始めるタイミングは、実際に車両が転舵し始めるポイントと実際のコーナの曲率開始点とのズレを常にフィードバックして行っていると仮説を立てた。

- ・視覚を遮断して、操舵角のフィードフォワード成分を抽出する方法を検討した。初心者は操舵量をフィードフォワード的に決定することは難しいが、バーハンドルではフィードフォワード成分が増大することが観察された。

## 参考文献

- 1) D. Kahneman, “Attention and effort, Englewood Cliffs”, NJ, Prentice-Hall (1973).
- 2) 警察庁交通局, 令和5年度中の交通事故の発生状況, (2023)  
<<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/bunseki/info.html>> (参照 2024-10-1)
- 3) 野田凌平, 藤井康夫, 毛利宏, “タイヤ緩和長が低ステアリングギア比車両の挙動に及ぼす影響と対策”, 自動車技術会論文集, Vol.52, No.6, (2021), p1192-p1197.
- 4) 北原圭, 孕石泰丈, 毛利宏, “ステアリング持ち替えを不要にする低ギア比操作系の開発”, 日本機械学会第22回交通・物流部門大会講演論文集, (2013), pp.235-236.
- 5) 北原圭, 玉川迅, 吉田秀久, ポンサトーンラクシンチャランサク, 毛利宏, “低速走行時の操舵負担解消を目指した新しい操舵系の開発とその有効性”, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.840, (2016).