

自動操舵システムとドライバとの協調方法の基礎研究 ～協調操舵の目標ゾーンとドライバへの誘導～

後藤武志* 黒川翔平** 長谷川尚哉* 久貝克弥*

Basic Study on Cooperation Method of the Automatic Steering System and the Driver's Steering Operation ～ Cooperative Steering Target Zones and Guidance to the Driver ～

Takeshi GOTO* Shohei KUROKAWA** Naoya HASEGAWA* Katsuya KUGAI*

We are researching a design method that realizes smooth cooperative steering between the automatic steering system and the driver. We believe that the strength of the driver's steering grip strength includes pre-read information about the driver's steering intention. We are researching a design method that realizes smooth cooperative steering between the automatic steering system and the driver. It is presumed that the strength of the grip force that the driver steers include prefetched information on the driver's steering intention. Therefore, we derived the evaluation index DOR, which expresses the degree of coordination with automatic steering, from the mechanical dynamics energy DE of steering and its differential value \dot{DE} . As a result of the simulator experiment, we clarified the target zone for realizing smooth cooperative steering without discomfort. Then, we report on the results of a study on a technique to guide the driver to smooth cooperative steering.

Keyword Cooperative control, Driving energy, Driver's operation ratio, Cooperation target zone

1. 緒言

近年、実現を目指して自動運転レベル 3 が商品化されている。これは状況に応じてドライバに権限移譲があるものの、自動操舵システムが責任主体として運転タスクを実行するシステムであり、システムとドライバが違和感なく協調することが重要となる。そのためには、ドライバの状態や意図の定量的な把握が重要である。しかし現状ではそれらを把握するための明確な指標がない。筆者らはドライバ操作と自動操舵システムとの関係を生態心理学における“相互作用”として捉え、ステアリングの機械力学エネルギーであるドライビングエネルギー (DE) を用いて、それに基づいた違和感のない自動運転との協調制御の研究をおこなっている^{1) 2) 3)}。本研究では、ドライバが操舵する際のステアリング把持力の強弱には、ドラ

イバ操舵意図の先読み情報が含まれていると考え、ドライビングエネルギー変化率 (\dot{DE}) から自動操舵との協調割合を表す評価指標 DOR (Driver's Operation Ratio) の導出をおこなった。そして違和感のない協調操舵を実現するための目標ゾーンを明確にし、ドライバを滑らかな協調操舵に誘導する手法について検討したので報告する。

2. ドライビングエネルギー (DE)^{2) 3) 4)}

2.1. ドライバと環境との相互作用

通常の運転では操舵角と操舵トルクを切り離して考えることはできない。一般車両の操舵系の入力は直接的には操舵角であり、ドライバがそれに必要な操舵トルクを加えるという形態であると共に、路面等の走行環境との相互作用で発生する車両挙動の情報を、操舵トルク変化としてドライバに伝えている。即ち、操舵系はドライバと車両との相互作用の結果を反映する双方向インターフェースであると考えた。

ここで相互依存下において各々の状態を明瞭にする条

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科 機械システムコース

**近畿大学工業高等専門学校

生産システム工学専攻 (機械系)

件が両立不可能な時、その関係を相補的⁵⁾というが、運転における舵角とトルクとの関係も相補的であると考えられる。系のパラメータが相補性を示す場合、その系のハミルトニアン H をオブザーバブル（可観測量）として相補性を示す現象を“一对で一つの物理的性質を呈する量”として捉えようとする考え方がある⁶⁾。

本稿では操舵角と操舵トルクとを相補的変数に対応させ、そのハミルトニアン H を“一对で一つの物理的性質を呈する量”のオブザーバ（観測系）として捉えた。ハミルトニアン H は物理学ではエネルギーに対応する物理量であり、操舵系システムではドライビングエネルギー(DE)と呼ぶことにする。

本稿ではこの弾性モデルを図1に示すような最も基本的な調和振動子として操舵系に用いることとした。ドライバは操舵角と操舵トルクを使い分けていて、操舵角と操舵トルクによって意図を反映している。また、ドライバと車の間には相互作用の関係があり、舵角とトルクは分離することが困難である。このことから、操舵角と操舵トルクを複合してドライバの意図を考える必要がある。路面とドライバとの間に、破線部で囲ったエネルギーフローを表す“オブザーバ（観測系）”を仮設した。そして、ドライビングエネルギー(DE)は、ステアリングを操舵する運動エネルギーとタイヤの弾性エネルギーの和からなる、機械力学的エネルギーと定義した。

$$DE = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}k\theta^2 = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(-T_{SAT})\theta^2 \quad (1)$$

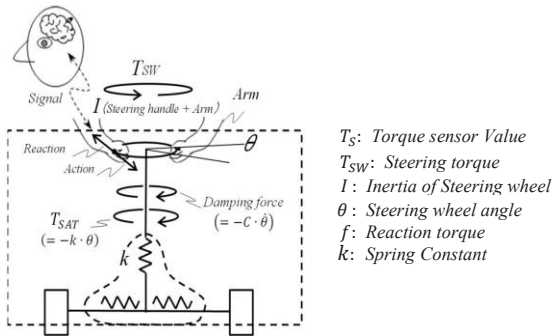


Fig.1 Driving Energy Model

2.2. ドライビングエネルギー変化率 (\dot{DE})^{7) 8) 9) 10)}

式(2)に実用式を使ったドライビングエネルギーの時間変化率(\dot{DE})を示す。

$$\dot{DE} = \dot{H} = I\dot{\theta}\ddot{\theta} + \frac{1}{2}(-T_{SW})\dot{\theta} + \frac{1}{2}(-T_{SW})\dot{\theta} \quad (2)$$

$$\dot{DE} = P_0 + P_1 + P_2 \quad \begin{cases} P_0 = I\dot{\theta}\ddot{\theta} \\ P_1 = \frac{1}{2}(-T_{SW})\dot{\theta} \\ P_2 = \frac{1}{2}(-T_{SW})\dot{\theta} \end{cases} \quad (3)$$

ドライビングエネルギー変化 \dot{DE} はEPSを含んだ観測系に入出力するエネルギーの変化を表している。 $\dot{DE} > 0$ の場合は観測系がドライバ操作やEPS、路面からエネルギーを供給されている受動状態、逆に $\dot{DE} < 0$ の場合は観測系がドライバやEPS、路面に対してエネルギーを放出している能動状態といえる。したがって、 \dot{DE} 指標によってドライバとの相互作用の状態を知ることができる。例えば、相互作用としての正入力及び反作用としての逆入力を考えると、反作用として発生する操舵トルク T_{SW} の変化が反映される \dot{DE} は“切り戻し操作”を表し、従来の $T_{SW} \cdot \dot{\theta}$ による判定($T_{SW} \cdot \dot{\theta} \geq 0$: 切り込み, $T_{SW} \cdot \dot{\theta} < 0$: 切り戻し)より早く検知することが可能となることを示した。

同じステアリング操舵であっても、ドライバのステアリング把持の仕方によって慣性変化が発生することになる。例えば、ライントレース操舵ではしっかりと把持するが、随意運転では緩めに把持するので、全ステアリング慣性モーメント I （ドライバの腕を含めたステアリング慣性）は変化すると考えられる。

式(18)を用いた操舵意図の検出では、 P_0 項に含まれるドライバの腕を含めたステアリングの慣性 I が重要であると考えられる。しかし、これをリアルタイムに測定するのは困難であるため、運動インピーダンスの考え方をを用いて推定をおこなっている。^{11) 12) 13) 14)}

2.3. ドライバ協調割合 DOR の推定

自動操舵とドライバ操舵が混在しながら操舵したときのトータル DE 量から、自動操舵のみの操舵での DE 量の差分が、ドライバだけが操舵したときの DE 量と仮設した。具体的には、評価指標として自動操舵とドライバが混在したトータル操舵の DE_{ma} から、自動操舵のみの操舵 DE_a を引いたドライバ操舵 DE 量と、自動操舵が混在したトータル操舵の DE_{ma} との割合を、ドライバの操舵割合指標 DOR と新たに定義した。

① 能動操舵：協調操舵 DE_{ma} 総量 $>$ 自動操舵 DE_a 総量

$$DOR [\%] = \frac{DE_{ma} - DE_a}{DE_{ma}} = 1 - \frac{DE_a}{DE_{ma}} \quad (4)$$

② 抑制操舵：協調操舵 DE_{ma} 総量 $<$ 自動操舵 DE_a 総量

$$DOR - [\%] = -\left(\frac{DE_a - DE_{ma}}{DE_a}\right) = \frac{DE_{ma}}{DE_a} - 1 \quad (5)$$

{ DE_{ma} : 自動操舵 + ドライバ, DE_a : 自動操舵}

3. シミュレータ実験

3.1. 実験装置

ドライビングエネルギーによる操舵意図の推定を、数値解析ソフトのMATLAB/Simulinkと簡易的なドライビングシミュレータでおこなう(図2)。ドライビングシミュレー

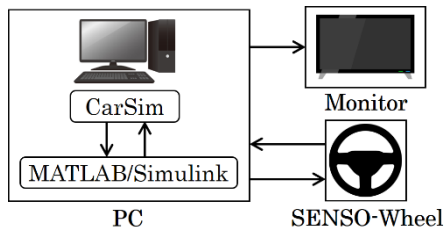


Fig.2 Schematic of Driving simulator

タは3面のLCDモニタ、ステアリング装置として実車に近い操舵反力を実現できるSENSO-Wheelから構成されている。車両運動シミュレーションソフトのCarSim DSにより算出した車両運動状態を3面のLCDに表示してドライバーハンドル系の操舵特性を検討する(図3)。



Fig. 3 Overview of CarSim DS & Senso-Wheel

3.2. 実験条件

実験の条件としては、ドライビングシミュレータでの車速は60km/hに固定し、図4の全長約600mの直進から旋回に続くS字コースでの検討を行う。S字コースの2つのカーブを、0秒~10秒区間で最初のステアリング切り込み操舵、10秒~20秒区間でステアリング保舵と切り戻し操舵、20秒~30秒区間で2回目のステアリング切り込み操舵、30秒~40秒間でステアリング保舵と切り戻し操舵をおこなう。

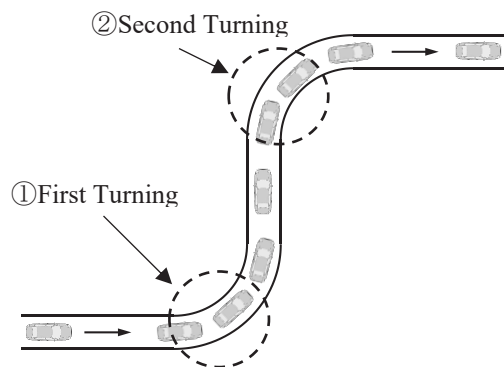


Fig.4 Simulation Course (V=60km/h)

3.3. ドライバ協調割合 DOR の計算結果

40秒間シミュレータ実験での、初級者のDOR計算結果を図5に示す。(4)式の定義より、DORが0%~100%が能動的な操舵となる。DOR=0%は、ドライバはステアリングを握っているが、力を入れずに、全て自動操舵にお任せにしている状態である。そして、徐々に能動的に操舵をする割合が増加して、DOR=100%では、ドライバは協調操舵をすることなく、自動操舵を無視して全て能動的に操舵している状態となる。

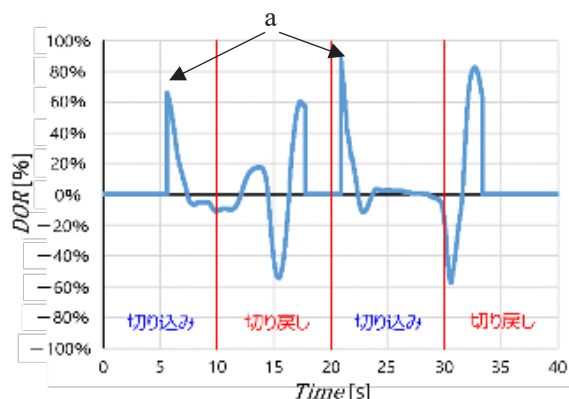


Fig.5 Beginner's DOR calculation result

(5)式の定義より、DORが0%~-100%が抑制的な操舵となる。抑制操舵とは、自動操舵に任せている状態であるが、自動操舵のステアリングの戻し速度が速い場合などに、ドライバがステアリング把持力を強くして、速度を抑制する状態である。速さが計算結果では、1回目のステアリング切り込み(0秒~10秒区間)と、2回目の切り込み(20秒~30秒区間)で、80%以上の能動的な操舵状態を示していることが分かる。特に、ドライバが自動操舵よりも早く操舵している場合(a)では、DORが100%に近くなり妥当な結果となっている。

4. 協調操舵の目標ゾーン設定

4.1. 滑らかな運転操舵

ドライバが滑らかな操舵をおこなう運転行動を明確にするため、DORを縦軸、DEを横軸にした概念図を図6に示す。横軸のドライビングエネルギー変化率DEが正の時は切り込み操舵(第1・第4象限)、負の時は切り戻し操舵(第2・第3象限)をあらわしている¹¹⁾。縦軸のドライバの操舵割合指標DORが0%~100%が能動的な操舵なので、ドライバが積極的にハンドル操舵をしている領域(第1・第2象限)と考えられる。逆に0%~-100%が抑制的な操舵なので、自動操舵による戻し操舵をドライバが主体的に抑制している領域(第3・第4象限)と考えられる。自動操舵のない通常の手動操舵では、切り込み時は能動的(第1象限)、切り戻し時は抑制的(第3象

限)な操舵であるので、概念図の第1・第3象限が滑らかな操舵領域と言える。

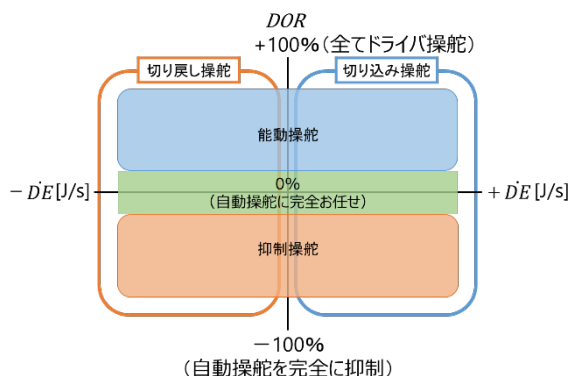


Fig.6 Classification of Driver's Steering Behavior

4.2. 協調操舵の目標ゾーン

図7に協調操舵が違和感なく滑らかにおこなわれるための目標ゾーンを示す。ドライバが自動に任せている状態 DOR 0% (自動操舵に完全お任せ)に近い領域を目標ゾーンと考えて設定した。尚、切り込み時に自動操舵より早く操舵すると DOR が100%付近まで上昇するが、これは自動操舵ロジックが、常に車線中央を目標コースとする簡易的なロジックのためである。システムがドライバの運転技量に合わせて、目標コースやタイミングを可変にすれば DOR は低下すると考えられる。したがって、現時点ではドライバが自動操舵より早く操舵した場合、べき乗指数関数の軌跡で素早く目標ゾーンに入るのが滑らかな切り込み操舵と考える。

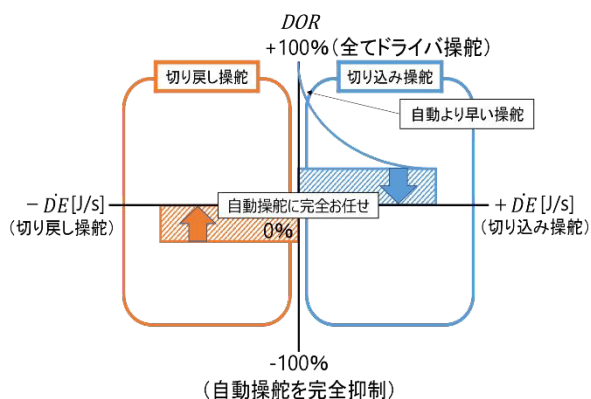


Fig.7 Target Cooperative Steering Zone (DOR and $\dot{D}E$)

4.3. 目標ゾーンの実験結果

設定した目標ゾーンの妥当性を確認する為に、運転技量の異なるドライバで検証をおこなった。図8に初級者の協調操舵の目標操舵ゾーン(以降、目標ゾーンと略す)、図9に中級者の目標操舵ゾーンを示す。

初級者は切り戻しの抑制割合が大きく、目標ゾーンから大きく外れているが、中級者は切り戻しで自動にお任

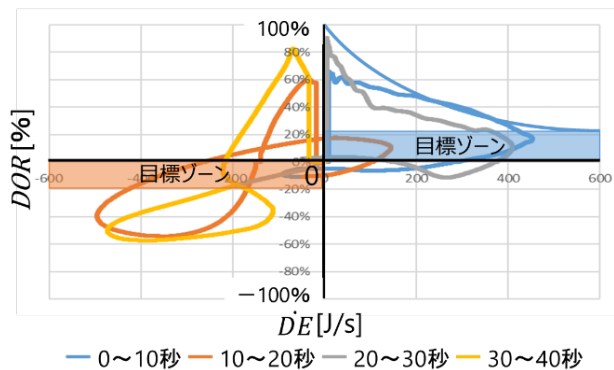


Fig.8 Beginner skill driver Target Cooperative Steering Zone

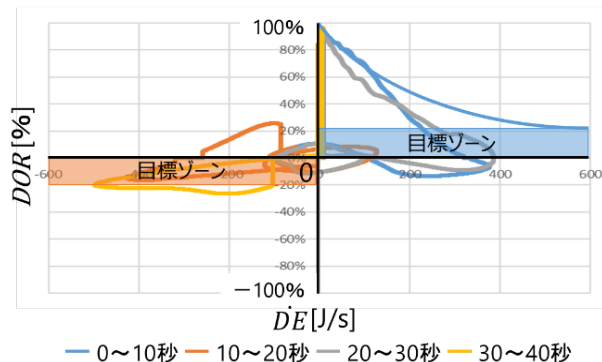


Fig.9 Intermediate skill driver Target Cooperative Steering Zone

せ割合 (DOR が0%近傍)が増加し、目標ゾーン内に大部分収束している。一方、切り込み操舵では初級者・中級者ともに、操舵初期の早めの操舵を除き、目標ゾーン近傍に収まっている。特に、中級者は早目の操舵直後に、べき乗指数関数の軌跡で素早く目標ゾーンに収まり、滑らかに補正操舵をしていると考えられる。運転経験が少ない初級者は、抑制操舵の時に目標ゾーンを外れ、第1・第2・第3象限での無駄な操舵をおこなっている。中級者は抑制操舵の時に目標ゾーン内に収まり、第1・第3象限内の滑らかな操舵をしていることが分かった。これらの結果から、協調操舵の目標ゾーンの妥当性が確認できた。

5. 生理学指標 (脳血流)

5.1. 脳血流によるドライバ行動の定量化

ドライバ(初級者, 中級者)の協調操舵の状態を、目標ゾーン内への収束性を検証し、加えて生理学的な状態を定量値で測定した。具体的には、脳血流計測装置を使い、脳血流の活性化ヘモグロビン量を計測し、協調操舵の目標ゾーンとの相関性を検討した。

図10のHOT-2000 (Neu製)装置を用いて、前頭葉の右脳と左脳の血中活性化ヘモグロビン量を測定し、タブレット端末 (NEC製)で計測データの処理をおこなう。計測区間 (40秒)の右脳と左脳の活性化ヘモグロビン量の全平均値をそれぞれ計算し、測定した活性化ヘモグロビン



Fig.10 Measurement Equipment (HOT2000 & PC)

量から平均値を除いた変化量を、活性化ヘモグロビン変化量と定義した。右脳の活性化ヘモグロビン量は、道路形状などの走行環境を視覚認識した時に活性化し、左脳は視覚情報に基づき、必要な操舵量などを考える時に活性化すると考えた。したがって、S字コースを自動操舵と協調して滑らかに走行するためには、右脳と左脳の活性化ヘモグロビン変化量が、それぞれ同期している状態であると仮設した。例えば、音楽を聴いてリラックスしている状態での右脳と左脳の活性化ヘモグロビン変化量は、殆どゼロ近傍で変化なく同期して推移していることを確認している。

5.2. 左脳と右脳の相関性結果

図 11 は、初級者の 40 秒区間での活性化ヘモグロビン変化量を表したものである。左脳（青線）と右脳（橙線）が互いに並行ではなく、交差した状態は非同期状態と考え

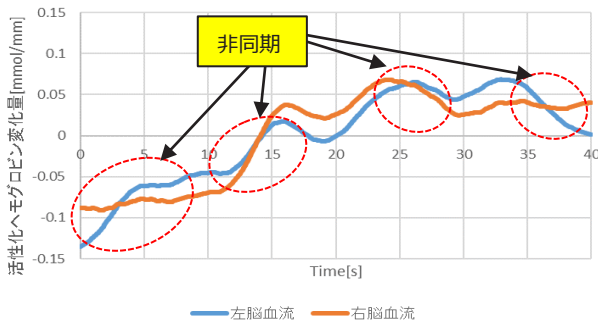


Fig.11 Synchronization of right and left brain flow over time (Beginner skill driver)

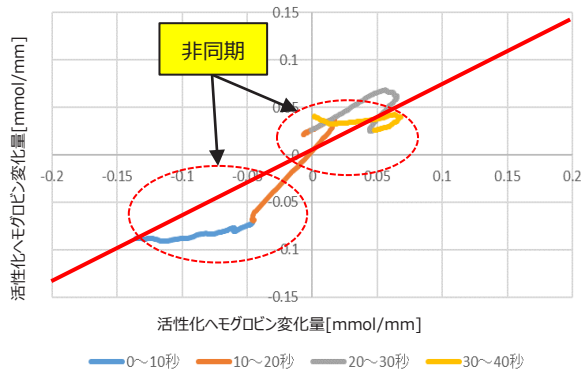


Fig.12 Correlation between left brain and right brain (Beginner skill driver)

られる右脳と左脳の相関性を図 12 に示す。図 12 は左脳と右脳の活性化ヘモグロビン変化量の相関性を示している。同期と非同期を分かり易くするために、図中に傾き 1 の直線（赤線）を追記し、相関性の基準線とした。相関線上もしくは平行になっている場合は、右脳と左脳が同期していると考えられる。尚、図中の青色線が 1 回目の切り込み区間（0 秒～10 秒）、橙色線が切り戻し区間（10 秒～20 秒）、灰色線が 2 回目の切り込み区間（20 秒～30 秒）、黄色線が切り戻し区間（30 秒～40 秒）をあらわしている。

同様に、図 13 と図 14 は中級者の活性化ヘモグロビン変化量と、右脳と左脳の相関性を示している。中級者は非同期部分が減り、相関線に沿っている部分が多くある事が分かる。これは、運転経験がある程度積み、ステアリング操舵に苦勞する事なく、滑らかな協調操舵ができている事が分かる。

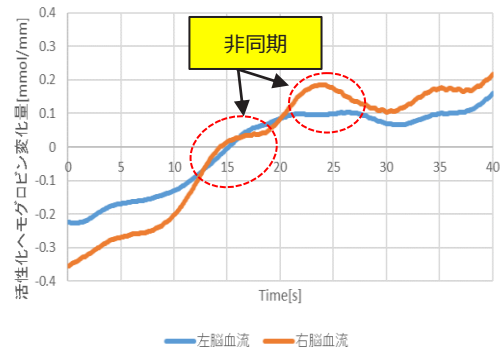


Fig.13 Synchronization of right brain and left brain flow over time (Intermediate skill driver)

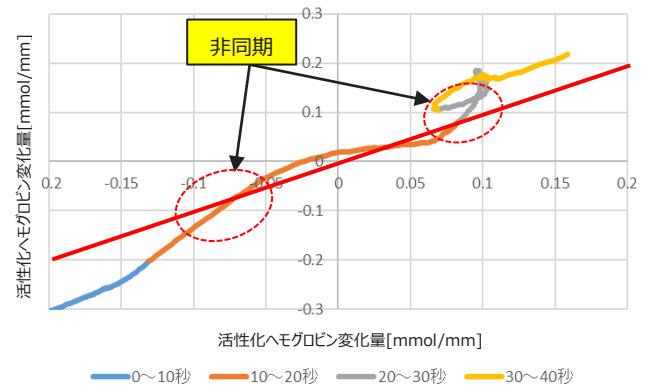


Fig.14 Correlation between left brain and right brain (Intermediate skill driver)

5.3. 目標ゾーンと生理学指標（脳血流）との関係

初級者（図 11-図 12）と中級者（図 13-図 14）の活性化ヘモグロビン変化量と、4 章で述べた物理指標の目標ゾーン（図 8-図 9）について比較をしてみる。

滑らかな協調操舵の目標ゾーンでは、初級者よりも中級者の方がより目標ゾーン内に収まってことを示したが、

脳血流の活性化へモグロビン変化量においても、同様な結果となっていることが確認できた。このことより、目標ゾーンと活性化へモグロビン変化量との関係は、簡易的ではあるが、ある程度示せるのではないかと考えられる。

6. 目標ゾーンへのドライバ誘導

全てのドライバが違和感なく滑らかな協調操舵をするためには、4章で述べた協調操舵の目標ゾーンに収まる操舵を、ドライバにさせるように誘導する設計手法の検討をおこなう。そこで、ドライバ側とシステム側の2面から検討をおこなった。

6.1. ドライバ側の対応 (ドライバへの視覚誘導)

ドライバへの視覚誘導として、走行車線中央に目標走行ラインを表示し、ラインに沿って走行をさせるタスク運転での実験をおこなった (図15)。

これまでの実験では、目標ラインを表示せず、自由に走行する随意運転であった。ドライバを目標走行ラインに誘導した場合に、目標ゾーンに対してど



Fig.15 Display of target line (Center of the lane)

のような変化があるかを、物理指標と脳血流について確認した。

図16はラインを表示した場合と、ライン無で自由に走行させた場合について、目標ゾーンに収まっているかを初級者と中級者で比較した結果である。初級者は、目標ラインで誘導すると、目標ゾーンに内に収まるが(赤○印)、ライン無で自由に走行させると収まらなくなる。逆に、中級者は、センターラインを表示せず、自分の走行ラインで自由に走行させると目標ゾーンに収まった(赤○印)。

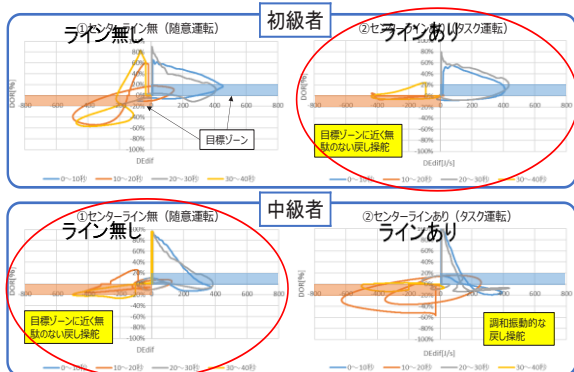


Fig.16 Target steering zone when guiding to the target line

図17は同様に走行した場合の、脳血流の相関性について

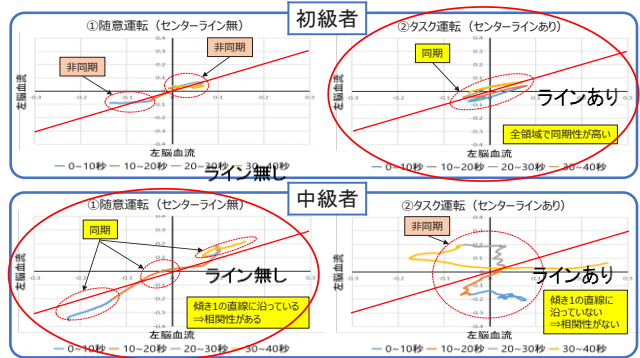


Fig.17 Cerebral blood flow during target line guidance

での比較結果である。脳血流も、目標ゾーンと同じ結果を示している。初級者は、目標ラインに誘導した方が脳血流の同期割合が増え(赤○印)、楽な運転をしている。逆に、中級者は、目標ラインに誘導せず、自分の走行ラインで自由に走った方が脳血流の同期割合が増え(赤○印)、違和感のない滑らかな協調操舵をしていることが確認できた。

視覚誘導することは、初級者にとって有効な手段であるが、ドライバの運転技量を推定して、技量に応じて適応させることが重要である。

6.2. システム側の対応 (ドライバへの制御誘導)

システム側の対応は、自動操舵が介入せず、ドライバが自由に操舵できる領域(実操舵角抑制値)の割合を変更し、目標ゾーンに対してどのような変化があるのかを確認した。本研究の自動操舵ロジックは、簡易的な1次前方注視点モデルを適用しており、その概要を図18に示す。

注視点での目標コースとの偏差量 ϵ [m] が、実操舵角抑制値 ℓ (以降、抑制値と略す) より大きくなると自動操舵が開始される。したがって、抑制値 ℓ が小さくなるにしたがい制御介入タイミングが早くなり、 $\ell=0$ の場合は常に自動操舵が作動する。

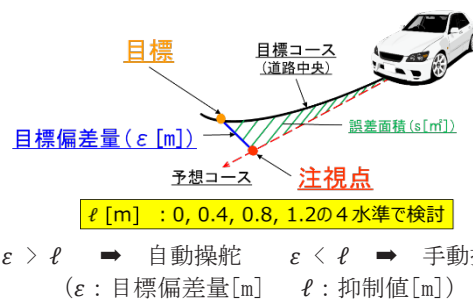


Fig.18 Overview of actual steering angle suppression

図19と図20に、初級者と中級者での実験結果を示す。尚、制御パラメータとして、 $\ell=0, 0.4, 0.8, 1.2$ の4水準で実験をおこなった。

図19の初級者では、抑制値 $\ell=0, 0.4$ で目標ゾーンに収まり、制御介入を早くして自動操舵にお任せにする割

合を増加させた方が滑らかな協調運転となっている。

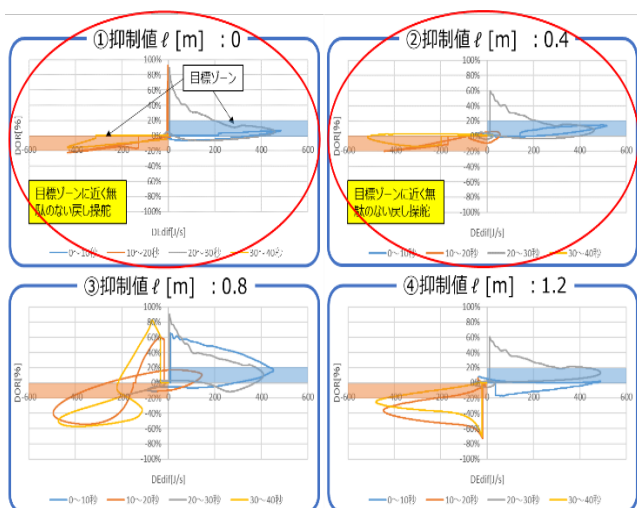


Fig.19 Target zone when changing the suppression value for the beginner skill drive

図 20 の中級者では、抑制値 $\ell=0.8, 1.2$ で目標ゾーンに収まり、制御介入頻度を減らしてドライバの自由度を増やした方が滑らかな協調運転になっている。

これらの結果より、通常走行での自動操舵システムの介入タイミングは、ドライバの運転技量に応じて、システム側の実操舵角抑制値を可変にすることが、滑らかな協調操舵にとって有効な手段である。

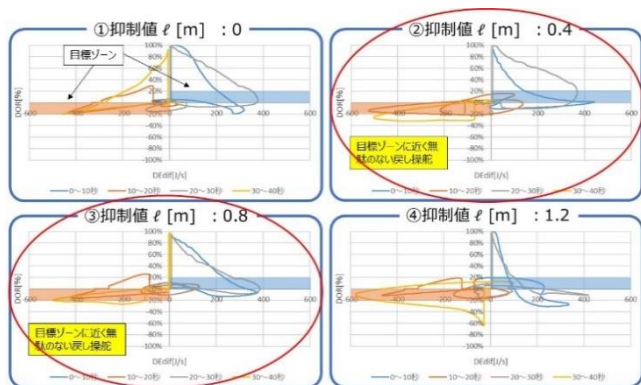


Fig.20 Target zone when changing the suppression value for the intermediate level driver

7. まとめ

1) ドライバ協調割合指標DORの導出

ドライバと自動操舵システムとの、連続的な協調操舵割合指標DORを新たに導出することができた。シミュレータ実験で、その妥当性を示すことができた。

2) 滑らかな協調操舵になる目標ゾーンの設定

DORが0%(自動に全て任せる)に近い程、スムーズな協調操舵と考え、0%近傍に目標ゾーンを設定した。運転技量違いの実験の結果、初級者は目標ゾーンから外れる割合が多く、経験が長い中級者は目標ゾーン内に収まり、特

に、戻し操舵の場合いが顕著になることが分かった。

3) 目標ゾーンへのドライバ誘導

① ドライバ側の対応 (ドライバへの視覚誘導)

目標コースとして、走行車線中央に目標走行ラインを表示し、ドライバを誘導した。初級者はスムーズな操舵になるが、中級者は自分のコースで自由に走った方が滑らかな協調操舵となる。

③ システム側の対応 (ドライバへの制御誘導)

自動操舵が介入せず、ドライバが自由に操舵できる領域(実操舵角抑制値 ℓ)の割合を変更した。初級者は抑制値 $\ell=0, 0.4$ で目標ゾーン内に収まり、早い段階から制御介入を優先するロジックの方が滑らかな協調運転となる。

中級者は抑制値 $\ell=0.4, 0.8$ で目標ゾーン内に収まり、制御介入割合を少なくして、ドライバ操舵を優先するロジックの方が滑らかな協調運転となる。

今回の滑らかな協調操舵となる目標ゾーンは、視覚的には分かり易い定性的な指標である。しかし、ドライバ誘導の最適化を図るためには、定量的な指標が必要になる。また、制御誘導に最も有効と考えられるのは、ステアリングの反力制御である。環境によって時々刻々変わる自動操舵システムとドライバ操舵との協調操舵の中で、操舵反力の最適化についても、今後の課題と考える。

謝辞

本研究実施にあたり、ドライビングシミュレータのステアリング操舵装置 SENS0-Wheel 貸与と、ご指導を頂いた共同研究者の(株)ジェイテクト様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 立原拓実, 後藤武志, 自動操舵システムとドライバとの協調方法の基礎検討～複合ドライバモデルと評価指標の検討～, 日本機械学会東海支部第 67 期総会・講演会講演論文集, No.183-1, 2018-406 (2018)
- 2) 木村雪秀, 久代育生, 後藤武志, 国弘洋司, 多重正弦波舵角入力による車両運動の周波数応答解析の一考察, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 6, (2014), 20144801
- 3) 木村雪秀, 国弘洋司, 後藤武志, 多重正弦波トルク入力による車両の周波数応答解析, 木村雪秀, 国弘洋司, 後藤武志, 自動車技術会春季学術講演会前刷集, No. 34-166, 20175166, (2017)
- 4) 後藤武志, 立原拓実, 久貝克弥, 自動操舵システムとドライバとの協調方法の基礎研究—ドライビングエネルギーを用いた操舵意図の推定(第2報)—, 近畿大

- 学工業高等専門学校研究紀要, No. 12, ISSN 1882-4374, pp. 19-26, (2018)
- 5) 原田僚, 小島泉, 岡村和弥, 西郷甲矢人, 谷村省吾, Multi-channel 系における相補性と双対性, 京都大学数理解析研究所講究録, 第 1705 卷(2010), p. 161-173
 - 6) 高林武彦, 保江邦夫, 量子力学 観測と解釈問題, 東京, 海鳴社 (2001), 193p.
 - 7) 後藤武志, 木村雪秀, 国弘洋司, 複合入力におけるドライバ操舵特性の評価指標に関する一考察, 自動車技術会論文集 Vol. 46, No. 5 (2015), pp. 951-956
 - 8) 後藤武志, 木村雪秀, 国弘洋司, エンタルピーを用いたドライバ操舵特性の新しい解釈方法, 日本機械学会第 23 回交通・物流部門大会, TRANSLOG2014, Vol. 38, No. 14-65 (2014), pp. 91-94
 - 9) 後藤武志, 木村雪秀, 国弘洋司, 操舵入力時のドライビングエネルギーの遷移状態に関する一考察, 自動車技術会学術講演会前刷集, No. 32-146, 20155146 (2014)
 - 10) 後藤武志, 立原拓実, 自動操舵システムとドライバとの協調方法の基礎研究ー複合ドライバモデルと評価指標の一考察ー, 近畿大学工業高等専門学校研究紀要, No. 11, ISSN 1882-4374, pp. 19-24, (2017)
 - 11) 立原拓実, 後藤武志, 1024 自動操舵と手動操舵が混在するシステムにおける協調方法に関する研究ードライビングエネルギーを用いた操舵意図の推定ー, 日本機械学会第 27 回交通・物流部門大会, TRANSLOG2018, No. 18-83 (2018)
 - 12) 田中良幸, 神田龍馬, 武田雄策, 山田直樹, 福庭一志, 正守一郎, 辻敏夫, “ステアリング操作における人間の手先インピーダンス特性の解析”, 計測自動制御学会論文集, No. 42, No.12 (2006), pp. 1353-1359.
 - 13) 鈴木寛郎, 朝尾隆文, 鈴木哲, 小谷賢太郎, “ステアリング操作時の運動インピーダンスの動的推定”, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 549-550 (2013).
 - 14) 谷萩隆嗣, “カルマンフィルタと適応信号処理”, コロナ社, pp. 118-122 (2005).