

シェアードコントロールオーソリティ遷移則の実機適用基本構想

高畑 健二*・太田 利夫**

(令和 4 年 9 月 6 日受付)

Basic concept for application of shared control authority law to actual Vehicle

Kenji TAKAHATA and Toshio OHTA

(Received Sep. 6, 2022)

Abstract

Shared control is a system that performs coordinated control in which the vehicle and the driver are integrated, and the steering input of the vehicle is automatically controlled by sharing the steering input from the driver and the steering input from the automatic driving system. Focusing on the steering power (steering torque \times steering angular velocity) with steering torque as an independent variable, we adopted a method to gradually decrease the authority of automatic driving torque, which is a dependent variable. The use of steering power, which is the basis of the energy required for steering, is based on the findings of previous research and the steering angular velocity (cross variable), which has a time dimension as a dual physical quantity treated in the physical function model, to express the agency of the driver more effectively and the steering torque (through variable), which does not have a time dimension, are dual, and the product of them is the steering power that expresses the time-series causality system.

In this paper, the feasibility of the override and the authority transition method for realizing shared control by experimental equipment. The basic concept of application is shown.

Key Words: Shared control, Authority transition, Steering power, override, Haptic

1. はじめに

シェアードコントロールとは、図 1 に示すように自動車とドライバが一体となった協調配制御を行うシステムであり自動車の操舵をドライバからの操舵量と自動運転システムからの操舵量をシェアード（協調配分）した結果を操作量として自動運転システムへ入力するシステムである。類似概念としてバイラテラル制御があるが、これはマスタ（主導）側が人間操作であり、スレーブ（従動）側がマニピュレータという形態で適用され、主導側、従動側およ

び、人間-機械間の操作量配分を表すオーソリティ（権限割合）が固定^{(1)~(3)}されている。一方、シェアード制御は主導側、従動側および、権限割合の協調状態が遷移する方式である。シェアードコントロールは、既存の自動運転レベル定義⁽⁴⁾だけでは規定できない。シェアードコントロールは、所謂「人馬一体」制御であり、自動運転技術の発展形として位置付けられる。つまり図 2 に示すように縦軸に示すようなシェアリングレベルと自動運転レベルを組み合わせたものになるシェアードコントロールを実現するための運転権限（オーソリティ）として、人の操舵性能は、操

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

** 名城大学理工学部メカトロニクス工学科

舵トルクや操舵角という独立したパラメータではなく、操舵パワーで評価することが妥当であるとの先行研究の成果⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾から、操舵トルクを独立変数とした操舵パワー（操舵トルク×操舵角速度）に着目し、従属変数である自動運転トルクのオーソリティを逡減させる方法とした。操舵に要したエネルギーの基となる操舵パワーを用いることは、よりドライバの意思を表すのに先行研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾の知見および、物理機能モデルであつかう双対物理量として、時間の単位をもつ操舵角速度（横断変数）と時間の単位を有しない操舵トルク（通過変数）が双対（Dual）となり、その積が時系列な因果律（システム）を表現する操舵パワーを独立変数としてオーソリティを遷移させることにした。本稿では、自動運転走行中にドライバによる介入操作（オーバーライド）によるシェアードコントロールを実現するためのオーバーライドおよび、オーソリティ遷移方法の実現性について実験装置⁽⁸⁾により確認した結果からシェアードコントロールオーソリティ遷移則の実機適用基本構想を示す。

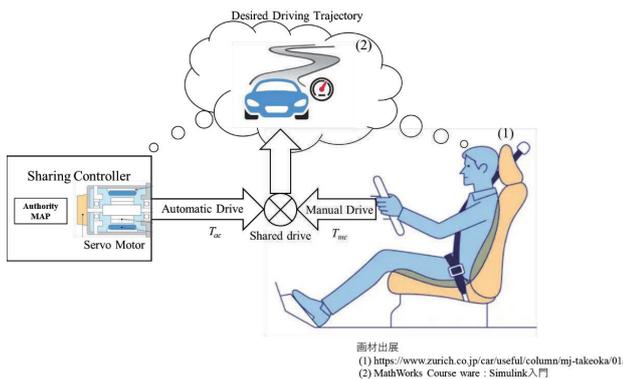


Fig.1 Concept of Shared Control

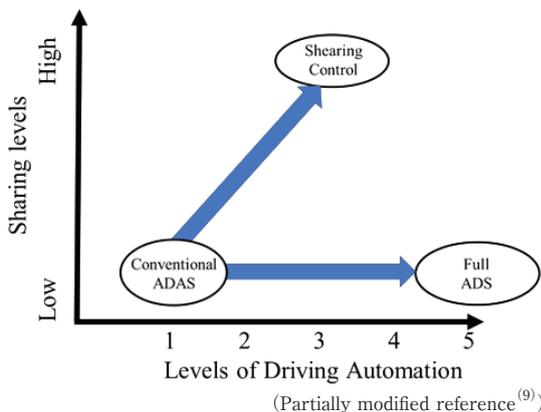


Fig.2 Shared control beyond existing automated driving level definitions (Partially modified reference⁽⁹⁾)

2. オーソリティ遷移則

本研究は図2に示したように既存の自動運転レベル定義を超えた人間と機械が協調するシェアードコントロールの

ためのオーソリティ遷移則であり、ある意味では「人馬一体」であり、自動運転技術の発展形として位置付けられる。

2.1 ドライバ意思の介入（オーバーライド）方法

- (1) 車両への入力操舵トルクは、自動運転システムの目標操舵トルク T_{ac} および、ドライバの介入操舵トルク T_{mc} の総和 ($T_{ac} + T_{mc}$) となる。
- (2) 介入時点では、ドライバは自動運転システムからの Haptic トルクを感じながら操舵する。
- (3) 実操舵トルク T_{mc} と目標操舵トルク T_{ac} との偏差に応じて、自動運転システムからの Haptic トルクが強くなるため、ドライバのオーバーライド（意思（エージェンシー））に応じて、自動運転システムのオーソリティを逡減させ、ドライバ意思の介入（オーバーライド）を自動運転システムへ受容させる。

2.2 ドライバ意思の介入（オーバーライド）方法

シェアードコントロールではドライバと自動運転システムのインタラクションである相互エージェンシー（意思）によって連続的に遷移する概念である。

これは人馬一体に倣い、乗馬の手綱に相当する HMI デバイス（ステアリング）により、Haptic としてクルマ（馬）からの走行エージェンシーの提示を汲み取りながら操舵することを意味している。

今回、シェアードコントロールを実現するための自動運転システムへの介入方法として、ドライバトルク (T_{mc}) と操舵角速度 (ω) を独立変数とした操舵パワー⁽⁵⁾⁽⁶⁾ ($T_{mc} \times \omega$) に着目し、従属変数である自動運転トルク (T_{ac}) と操舵角速度 (ω) による自動運転操舵パワー ($T_{ac} \times \omega$) のオーソリティMAPを逡減させる方法とした。

操舵パワーを $T_{mc} \times \omega$ とすると操舵角速度 ω が発生しない場合には、速度（ランプ）偏差が発生するため、 ω の積分による $\Delta\theta$ を加えた $T_{mc} \times (\omega + \Delta\theta)$ 、 $T_{ac} \times (\omega + \Delta\theta)$ を操舵パワーとして適用した。

モデル化の第一原則⁽¹⁰⁾に基づき、オーバーライドを起点として保舵までの操舵トルクの時間的な流れを通過変数（スルー変数）とすることで、ドライバがなすべき操舵パワーを容易に規定でき、ドライバモデルと制御対象（Haptic Motor）との整合性が明確になるため、モデルシミュレーションが主体である MBD（MILS）設計開発手法に最適である。

注：MBD: Model Based Design, MILS: Model In the Loop Simulation

操舵パワーによるオーバーライド・オーソリティ遷移則を図3に示す。

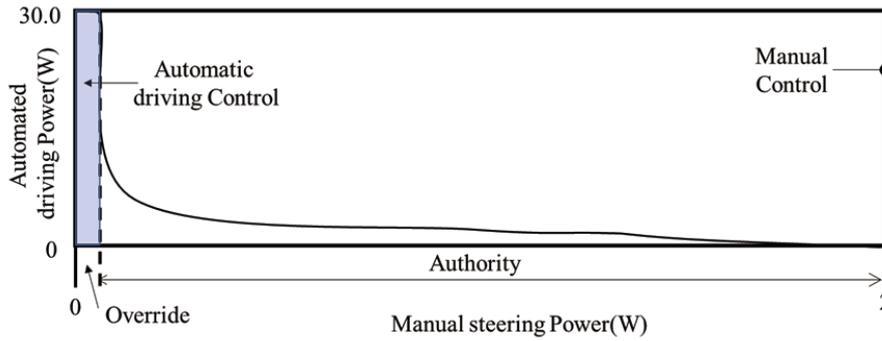


Fig.3 Override authority transition map

オーバーライド・オーソリティ遷移則は、横軸がドライバーの操舵パワー、縦軸が自動運転システムの操舵パワーによりオーソリティ遷移を実現する。ドライバーのオーバーライド（意思）によりオーバーライドからオーソリティ遷移へ移行することで自動運転システムのオーソリティを逡減させドライバーと自動運転システムの協調を実現する。

オーソリティ遷移則は以下の機能を有するように設計した。

- (1) オーソリティの割合が常時、オーバーライドスイッチ等を用いることなく連続的に行える。
- (2) 自動運転システムは常時稼働し、ドライバーは自動運転システムに常時介入復帰できる。
- (3) ドライバーは、自動運転システムの意思（エージェンシー）を把握し易い。

2.3 シェアードコントロールにおける HMI 基本原則

自動運転レベル3では、ドライバーがステアリングから手を離している時に、運転（操舵）権限を瞬時にドライバーに切り替えると、ドライバーがそれに対応できずに車両挙動が乱れるなどの危険な状態に陥る可能性がある。このため、システムがドライバーにオーソリティを切り替える意図を確実に伝えるための HMI と、十分な時間的余裕をドライバーに与えることが自動運転システムに求められる。さらに走行中では、自動運転システムからドライバーへの車両の状態などのエージェントの意図の提示が可能なように、表1のガイドラインの項目1を適用した。

3. シェアード制御の実現性確認

3.1 実験装置⁽⁸⁾

実験装置は、ステアリングシステムに視界用のモニターを有し、車両コックピットからの視界映像を表示する。ステアリングシステムに装備される Haptic モータは、一般

Table 1 HMI Basic Principles in Shared Control (Control Principles (Partial modification of reference⁽¹¹⁾⁾)

No.	Principle	LAW	Applicable for this research
1	Control	The operation of the system should always be easy for the driver to override. When collisions can be avoided under normal driving conditions	Applicable
2		If the system determines that a collision is imminent, the system should be able to avoid the collision and mitigate the damage.	Not Applicable
3	Operational	The driver must be able to manually switch the system from ON to OFF and maintain the OFF state under normal operating conditions.	Not Applicable
4		In a system that controls a vehicle in a dangerous driving state, the system must operate from the initial state.	Not Applicable
5	Indication	If the system controls the speed and / or track of the vehicle, give the driver a clear indication.	Not Applicable
6		If the system malfunctions or fails, indicate the status to the driver.	Not Applicable
7		The system should indicate to the driver the transfer of control authority.	Not Applicable

的なサーボモータである。ステアリングコラムシャフトには、トーションバー（トルクセンサ）が内蔵される。図4に実験装置の概要を示す。

実験装置は、ドライバからの操舵入力（図4-①）をHapticモータのエンコーダ（図4-②）によりステアリング状態を計測するとともにトルクセンサ（図4-③）により入力操舵トルクを計測する。その舵角を用いて車両運動（図4-⑤）を行う。一方、ステアリング情報（角度、角速度、角加速度）からMM（Model matching）を用いてDSトルクを生成する（図4-④）。更に、車両情報（横加速度、図4-⑥）から最適オブザーバを用いてRIトルクを生成する（図4-⑦）。

次に、操舵トルクを目標値として、DSトルクとRIトルクを重畳させHapticモータによりドライバに対しHapticトルクを生成する（図4-⑧）。

測定した操舵トルクおよび、自動運転用トルクからオー

ソリティ遷移によりシェアードコントロール（図4-⑨）を実現する。

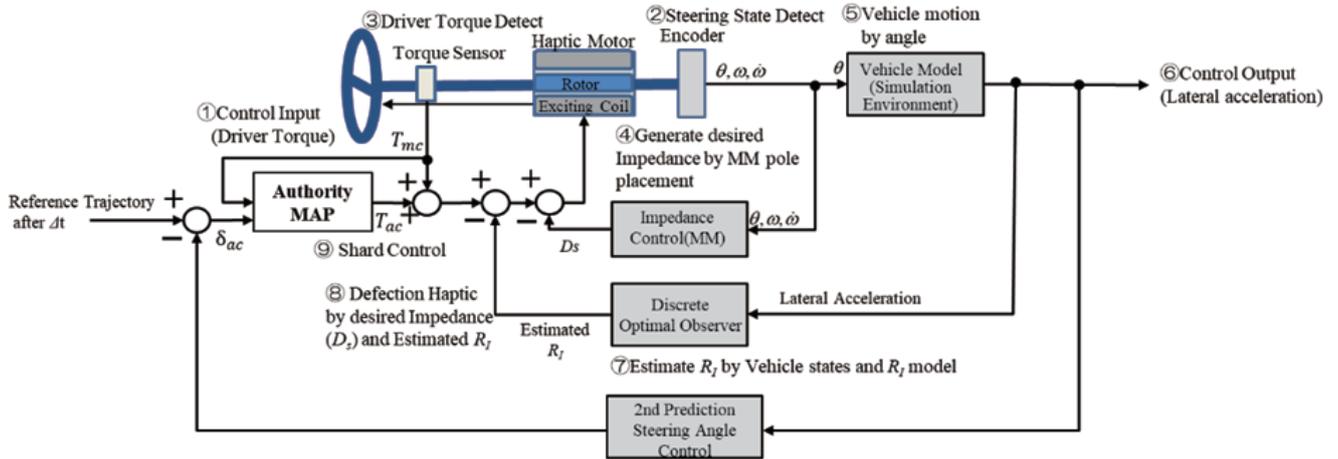
3.2 実験条件

MILSシミュレーションによる走行コースは、定常円旋回とし、ドライバによるオーバーライド時の介入状況を確認するために定常円コース上に障害物を設置してある。定常円旋回の走行コース条件を表2に示す。

3.3 確認方法

オーバーライド方法および、オーソリティ遷移曲線について、以下の項目を確認することで実現性を判断した。

- (1) 走行時におけるドライバオーバーライド前後の操舵角および、走行軌跡の連続性
- (2) ドライバオーバーライド時のオーソリティ遷移曲線適用によるHaptic遷移の円滑性



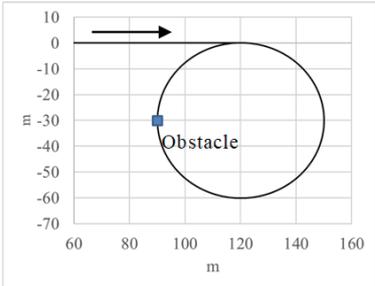
Block diagram of experimental equipment



Photograph of experimental equipment.

Fig.4 Outline of experimental equipment

Table 2 Driving conditions by MILS simulation

	Conditions
Course Profile	Steady state Circular Radius:30m ⁽¹²⁾ 
Obstacle Profile	Cubic 1m×1m×1m
Vehicle Velocity	30km/h(8.3m/s)

3.4 実現性の確認

(1) ドライバオーバーライド

定常円旋回中のドライバによるオーバーライドの操作性をオーバーライド前後の操舵角のおよび、走行軌跡の連続性により実現性を判断した。連続性は、一般のタイヤのコーナリングスティフネスが飽和領域とならない横加速度 5 m/s^2 以下⁽¹³⁾であることによって評価した。

MILSによる実験結果から、オーバーライド方法の実現性について以下を確認できた。

- ・障害物に対してドライバ介入操舵により障害物を横加速度 5 m/s^2 以下で回避可能。(図5, 7参照)

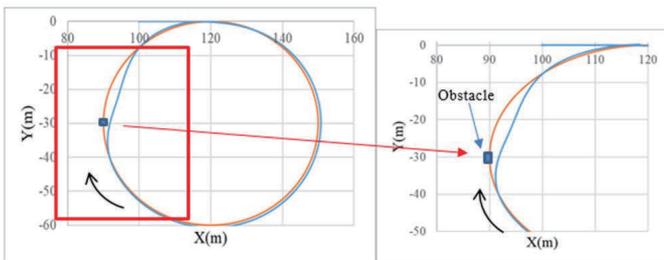


Fig.5 Driving trajectory avoiding obstacles

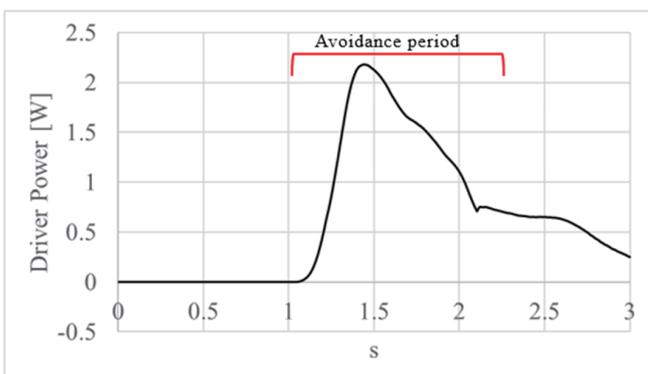


Fig.6 Steering power avoiding obstacles

- ・障害物回避後についても、横加速度 5 m/s^2 以下で自動運転に復帰可能。(図5, 7参照)
- ・障害物回避は、参考文献(6)で示されている値 (180W) よりも十分に小さな操舵パワーで実現可能。(図6参照)

(2) オーソリティ遷移

走行時におけるドライバオーバーライド時の Haptic 遷移 MAP によるオーソリティ遷移の実現性を判断した。図8に障害物を回避するためのドライバ介入時の Haptic 遷移図を示す。Haptic 遷移図は、横軸にドライバ操舵パワー、縦軸に自動運転操舵パワー、垂直軸に Haptic を示す。

図8①から、ドライバが更に操舵介入（オーバーライド）意思を示すことで、ドライバのオーバーライド（意思（エージェンシー））に応じて、自動運転システムのオーソリティを減していることが確認できる。

図8②から、手動操舵パワー増大に伴い、インピーダンストルク成分も変化していることが確認できる。

(3) シェアードコントロールの実現性

この結果からオーソリティ遷移曲線を適用することで、ドライバと自動運転システムのオーソリティの割合を、ド

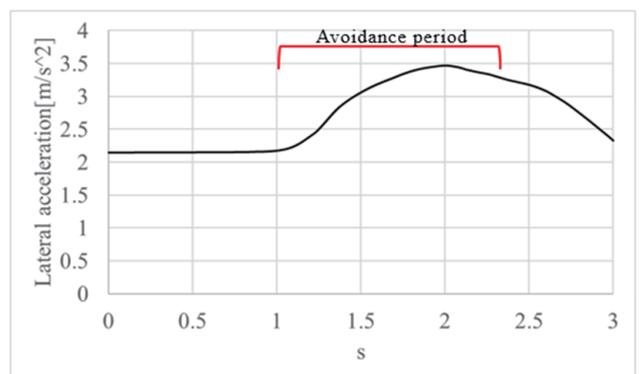


Fig.7 Vehicle lateral acceleration avoiding obstacle

ライバと自動運転システム相互（インタラクション）の意思（エージェンシー）に基づきオーソリティおよび、インピーダンストルク成分を連続的に変化させるシェアードコントロールの実現性を確認できた。

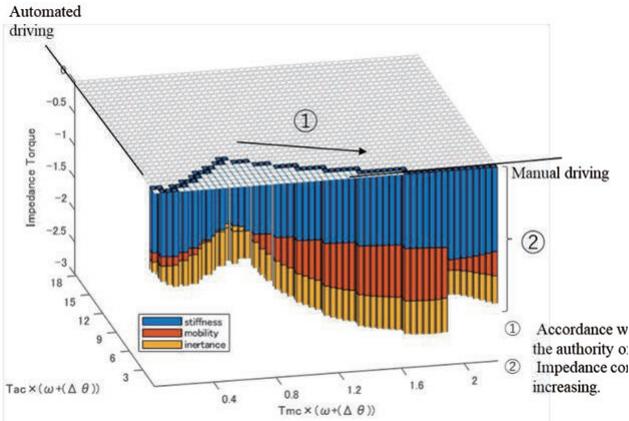


Fig.8 Haptic transitions when overriding

4. 結 言

ドライバと自動運転システムのオーソリティの割合を、ドライバと自動運転システム相互（インタラクション）の意思（エージェンシー）に基づき連続的に変えるシェアードコントロールの実現性に対して以下の確認によってシェアードコントロールオーソリティ遷移則の実機適用基本構想の要件を抽出できた。

- (1) クルマからの走行エージェンシーの提示である Haptic について、HMI デバイス（ステアリング）によって汲み取れることが確認できた。
- (2) MHI 原則（表 1）の制御則で要求されているドライバによるシステムへの介入が連続的に小さな操舵パワーで実現できることが確認できた。
- (3) 時系列な因果律を表現する操舵パワーをオーバーライドの介入独立変数にする妥当性を確認できた。
- (4) 時系列な因果律を表現する操舵パワーをオーバーライドの介入独立変数とした、ドライバの意思（操舵トルク）と車両から意思（操舵角速度）の因果関係を表現するインタラクションによって連続的なオーソリティ遷移が実現出来ることを確認できた。（図 9 参照）

5. 今後の展望

実機への適用に際し、4章の結言に対して考慮すべき要件について参考文献⁽¹⁴⁾等を参考にして以下にまとめておく。

(1) 操舵系オーソリティ遷移

ドライバが操舵モードを自動から手動に変更するように要求する理由は多様である。

変更する状況は、自動操舵システムが続く経路からの単純な離脱、車両のセンサーによって検出されていない障害物の回避も考えられる。

後者のような例では、ドライバが反応する時間が制限される。人間はストレスがあると、対応するボタンを見つけ、押下して手動ステアリングへの移行操作することがタイムリーに行われる可能性は低くなる。

介入が予期できない状況では、ドライバはハンドルを握り、車両を手動で操縦する可能性がある。

この自然な反応から、シェアードコントロールによる操舵系オーソリティ移行の操作は直感的であるため、より安全である。

(2) シェアードコントロールの双方向性

ドライバが自動操舵システムを無効にする方法、すなわち、自動操舵から手動操舵に遷移する手段は規則（JASOTP18004のレベル3）で規定されているように、オーソリティの遷移は操舵システムのみを使用して実現する必要がある。

一方、手動操舵から自動操舵への遷移は規則（JASOTP18004のレベル3）には明記されていないが、同様の方法で実現する必要がある。

このためには、オーソリティ遷移機能は双方向性を有するように設計する必要がある。

典型的な使用例として、高速道路での車両追越しなどはドライバによる一時的操作であり、その後、たとえばボタンやレバーを操作することなく自動操舵を再開する必要がある。

(3) 情報フィードバック

ドライバにとって操舵入力の要否、つまり車両が手動または自動操舵モードを認識できる必要がある。

この情報は、視覚または音響信号を使用して提供可能である。ただし、オーソリティ移動は操舵システムによって

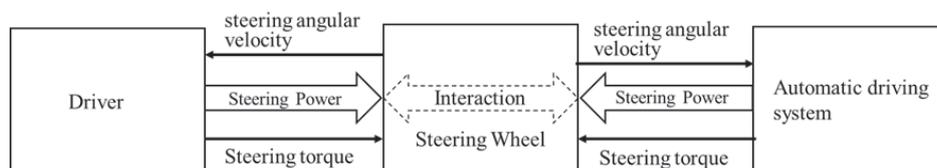


Fig.9 Interactions expressing causality

機能されるため、情報フィードバックも操舵システム内で提供する必要がある。したがって、この機能は、運転中の操舵制御モードに関する情報を触覚 (Haptic) フィードバックによってドライバへ提示する必要がある。

(4) オーソリティ遷移時間

自動操舵システムによって引き起こされる事故の危険性が差し迫っている場合、ドライバはできるだけ早く車両を制御する必要がある。

一方、ドライバが自動化システムに制御を委ねることを望む場合、ドライバの我慢は可能な限り少なくする必要がある。ゆえに、オーソリティ遷移制御モードに遅延は許されない。

(5) オーソリティ遷移条件

自動操舵制御モードではドライバ入力を拒否する一方で、手動操舵制御モードでは、ドライバの操舵操作を支援することを目的としている。

自動操舵と手動操舵間の移行は、ボタンなどの専用スイッチを使用して操作可能だが、ボタンを押下操作は予期しない状況の場合のドライバは自然な反射的対応ができず、直観性の要件を満たさない。

または、ドライバがハンドルを握っているかどうかを監視して、車両を手動または自動操舵モードにする必要があるかどうかを判断することも必要である。

しかしながら、これではシステムが横方向制御のオーソリティを持っている間、ドライバはハンドルに添えた手を休ませることはできない。

(6) オーバーライド

ステアリングホイールに偶然触れた場合、ドライバにオーバーライドの意図がなくとも自動操舵システムが解除され、車両の安全性が損なわれる可能性がある。

自動操舵モードでステアリングホイールに過剰なトルクが加えられた場合（オーバーライド状態）では、ドライバにオーソリティを移すべきであるが、このような方法で手

動操舵に切り替えると、ステアリングホイールの偶発的な衝撃、たとえば摩擦が原因で、トルクセンサへの外乱によって生じる望ましくない遷移のリスクが生じる場合がある。さらに、快適なオーソリティ遷移を保証することは困難である。

(7) シェアードコントロールにおける SAS, CAS

自動操舵モードでは、自動操舵コントローラはドライバのステアリングホイール操舵に逆らうように作動 (SAS機能) させ、逆に、手動操舵モードでは、ドライバのステアリング操作を支援 (CAS機能) することに特化させるべきである。動的運転タスク部分を示す JASOTP18004 に基づく運転タスク概略図における SAS, CAS の位置づけを図10に示す。

SAS: Stability Augmentation System

CAS: Control Augmentation System

(8) 操舵サーボについて

航空機は、シリーズサーボ、パラレルサーボの両方を装備しているが、車のシェアードコントロールに用いるサーボは、パラレルサーボがEPS（電動パワステ）に容易に実装できかつ、反力は可逆であることから主流である。

安定性増大（SAS）目的の場合はドライバに介入が分からないシリーズサーボのほうが良い。

- ・シリーズサーボ：操縦桿と舵面アクチュエータの間に直列にサーボを入れる方式であり、舵面からの反力はパイロットへは不可逆である。

- ・パラレルサーボ：操縦桿と舵面アクチュエータを並列に配してそれらを、リンクで結合して舵面を駆動する方式であり、舵面からの反力は可逆である。

なお、FBW（航空機）、SBW（自動車）ではこの区別は曖昧に使用されているので、注意が必要であるが、反力の可逆、不可逆の観点でサーボ系を捉えるための知識として記載してある。

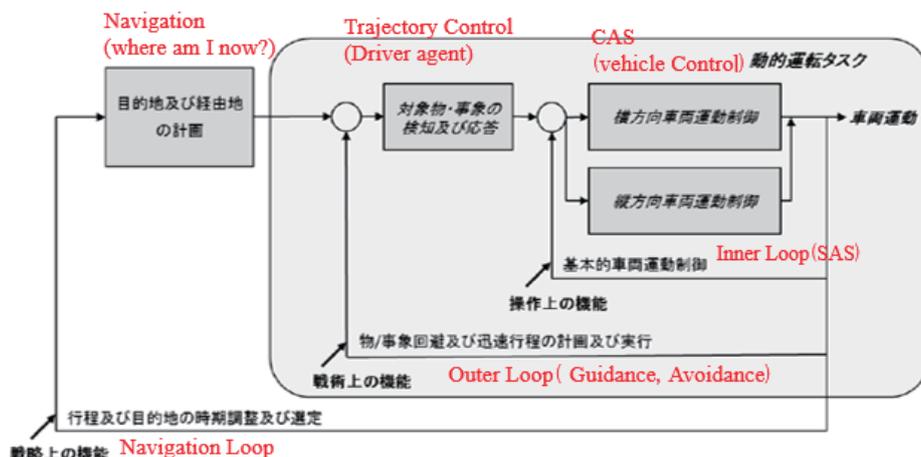


Fig.10 Driving task schematic diagram showing the dynamic driving task part by JASOTP18004

謝 辞

この論文は名城大学理工学部メカトロニクス工学科楊・太田研究室との共同研究の一環としてまとめたものである。さらに、状態推定理論の本研究への応用および、適用に関しては、元・名古屋大学工学研究科教授の高浜盛雄先生のご指導を賜りました。

この場を借りて、共同研究者である太田利夫先生、楊剣鳴先生ならびに、高浜盛雄先生に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 太田利夫, 楊孫東, 高畑健二, 楊剣鳴, 異なる推定方法のオブザーバによるロバスト操舵制御則の外乱抑制効果の比較, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.19-00441.
- (2) Ohta, T., Yang, J., Yasuzumi, K., Takahata, K., Research on Haptic Generating Control Law for SBW by Impedance Control Using Model Matching Assumed Shared Control Usage, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Volume 9, No. 8 (2020), pp.1205-1212, DOI: 10.18178/ijmerr. 9. 8. 1205-1212.
- (3) 太田利夫, 楊剣鳴, 加藤匡剛, 笠川亮, 高畑健二, MBDによるRCPを活用したSBWのための人工操舵感生成則の設計開発, 設計工学論文集, Vol.57, No. 11 (2022).
- (4) JASO TP 18004-2022, 自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義 (2022)
- (5) 近藤政市, 操舵に要する力及び反応の力学に就いて, 日本航空學會誌 Vol. 3, No.14, pp.215-219 (1936)
- (6) 近藤政市, 基礎自動車工学 後期編, 養賢堂, pp.258-259 (1967)
- (7) 近藤政市, 操縦性安定性ひとすじ, 自動車技術会インタビュー, (1995), p.70
- (8) 高畑健二, 里信純, 安塚周磨, 八房智顯, 安鍾賢, 教育装置 次世代知能化技術実験システムの開発, 広島工業大学紀要 教育編, Vol.21 (2022)
- (9) 日本学術会議, 総合工学委員会, 機械工学委員会合同工学システムに関する安全, 安心, リスク検討分科会:平成29年6月27日 (2017)
- (10) 自動車技術会共同研究センター, 自動車開発におけるプラントモデル I/F ガイドライン (ver.4.0), (2021), p.10
- (11) 向江秀之他, 高度運転支援システムのHMI原則, 計測と制御 Vol.54, No.11 (2015), pp.841-844
- (12) 自動車技術会, 自動車技術ハンドブック (試験・評価編) (1992), pp.113-114.
- (13) 堀内伸一郎, 自動車の運動性能, 自動車工学基礎シリーズ, 自動車技術会 (<https://www.jsae.or.jp/~dat1/mr/motor16/mr200270.pdf2> (2022.5.1参照))
- (14) Maxime Moreillon, Tsutomu Tamura, Robert Fucs, Transfer of Lateral Control Authority for Automated Vehicles, 自動車技術会学術講演予稿集, pp. 1-7 (2018)