

# SBW に適用する予測操舵に対する人工操舵感 (Haptic) の研究

高畑 健二\*

(令和3年8月31日受付)

## Research on predictive steering and artificial steering Haptic for SBW

Kenji TAKAHATA

(Received Aug.31, 2021)

### Abstract

In this research, we further developed the knowledge about the effectiveness of the method of evaluating the steering characteristics of the driver by the frequency component (PSD, Power Spectral Density) of steering, which is the research result of Reference<sup>(4)</sup>, and for predictive steering in the SBW system. By expressing the inertial reaction force from the vehicle by the frequency component (PSD) and superimposing that component on the steering reaction force (Haptic), the state (reaction) of the vehicle can be expressed in the same way as the conventional steering system with mechanical coupling. The purpose of this research will be to analyze the basic mechanism of transmission to the driver.

The final goal of this research should be sharing control that transitions between automatic operation and manual operation with the intention of the driver, but this time, we focused on Haptic, which is the steering reaction force of the SBW system during the transition, and made a series of research plans. Among them, we will report the results of consideration for confirming the feasibility of reflecting the inertial reaction force (RI: Reaction Inertial torque) from the vehicle with respect to the predicted steering in the Haptic, useful findings, and future issues.

**Key Words:** Sharing control, Steer-by-wire, Haptic, Predictive steering control, Reaction Inertial torque

### 1. はじめに

従来からの自動車で運転経験を積んできたドライバーにとって、運転支援が装備された車両からの情報を受け取る場合、いわゆるオートメーションサプライズが生じ易い。

特にEPS(電動パワーステアリング)やSBW(ステアバイワイヤ)が装備された車両のステアリング操舵における車両からの操舵反力が人工感覚として生成される場合<sup>(1)-(3)</sup>や、運転支援モードがシステム都合で遷移した場合<sup>(4)(5)</sup>は従来の機械的結合の操舵系に慣れ親しんだドライバーは車両

側からの人口感覚の意図が直観的あるいは、経験的に未体験であり、違和感や誤操作を起こす可能性が大きい。

前年度の研究成果<sup>(6)</sup>では、今後、進化してくる運転支援技術さらには自動運転車両がドライバーにとって親和性を有することは、運転支援車両あるいは自動運転車両をシニアドライバーが増大してくる社会において受容性のあるモビリティとするための有効性について報告した。

本研究では前年度の研究成果<sup>(6)</sup>である操舵の周波数成分(PSD, Power Spectral Density)によってドライバーの操舵特性を評価する方法<sup>(7)</sup>の有効性に関する知見をさらに発展

\* 広島工業大学工学部知能機械工学科

させ、SBW システムにおける、予測操舵に対する車両からの慣性反力を周波数成分 (PSD) で表現し、その成分を操舵反力 (Haptic) に重畳させることで、車両の状態 (反応) を従来の機械的結合のある操舵系と同様にドライバに伝達する基本的メカニズムを解明することを今回の研究目標とした。本研究の最終目標は自動運転と手動運転をドライバの意図で遷移させるシェアリングコントロールであるが、今回は、その遷移中における SBW システムの操舵反力である Haptic について着目し、一連の研究計画のうち、予測操舵に対する車両からの慣性反力 ( $R_I$ : Reaction Inertial torque) を Haptic に反映させる実現性確認のための研究成果、有用な知見および、今後の課題について報告する。

## 2. 予測操舵 Haptic

目標地点に向かうための予測操舵に対する、操舵 Haptic (以下、Haptic) との関係は、先行研究<sup>(7)</sup>によって、以下の分類であると報告されている。

本研究では(2)項の予測進路偏向操舵 (予測操舵) に対する Haptic についての研究成果を論述する。

- (1) 現在進路保舵 (道路形状) に対する Haptic
- (2) 予測進路偏向操舵 (予測操舵) に対する Haptic
- (3) 修正に対する操舵 (修正操舵) に対する Haptic

### 2.1 Haptic トルク

#### 2.1.1 予測操舵に起因する Haptic

図 1 に進路情報である車両進路の時間経過と Haptic の関係について図示する。ドライバ操舵は直線走行や定常円旋回時は操舵角を保持するための保舵操舵 (図中の上段、



Sight of View is quoted from following URL.  
<https://www.mazda.co.jp/beadriver/cockpit/view/01/>

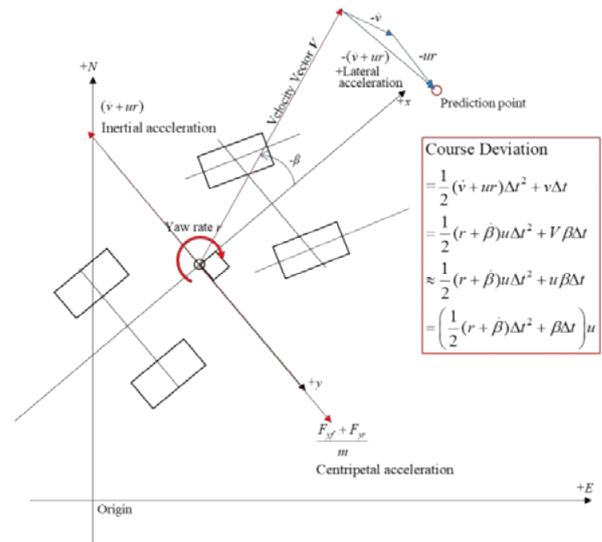
Fig.1 Road information required for steering Haptic

操舵トルクが偶力になっていないことに注意されたい。), 直進から旋回への遷移が必要時は操舵角速度を発生するための転舵操舵 (図中の中段、操舵トルクが偶力になっていないことに注意されたい。), 旋回遷移中の操舵角速度を修正が必要時は操舵角加速度を発生するための当て舵または、追い舵 (図中の下段、操舵トルクが偶力になっていることに注意されたい。) が必要になる。

今回の研究対象である予測操舵に関する Haptic は図 1 の中段に相当する。

この状況の速度ベクトルと予測点への偏向加速度 (求心加速度, 横加速度) の関係を図 2 に示す。この偏向加速度は円旋回で生じる遠心加速度に抗するために発生するものである。この場合、ドライバの操舵トルクはこの偏向加速度を生じさせる操作量であり、遠心加速度に相当する反力が操作量に抗う反力 (Haptic) となる。

また、この偏向加速度を 2 階積分したものが予測コース偏差となる。



$u$ : Longitudinal velocity,  $v$ : Lateral velocity,  $r$ : Yaw rate,  $m$ : Vehicle mass,  $\beta$ : Side slip Angle of CG,  $\Delta t$ : Prediction time,  $F_y$ : Side Force

Fig.2 Velocity Vector and Lateral acceleration

## 3. Haptic 生成アルゴリズム

構造が不明の  $R_I$  モデルをアприオリ (先験的) に白色雑音で駆動される線形システム (弱定常 2 次過程) とし、最適オブザーバ (KF, Kalman Filter) を用いてイノベーション結果の反映による  $R_I$  の推定に対する実現性を研究する。

イノベーション (白色性) から KF 推定した (弱定常 2 次過程) を入力として、自動操舵時は 2 次予測舵角操舵のテイラー展開を ZOH (Zero Order Hold) で模擬して Haptic 反力として操舵端へ入力する。

なお、HILS 手動操舵時は ZOH を外し、3.3 節の方法によってパルス伝達関数の有する離散系効果を等価的に模擬する。

3.1 2次舵角予測制御の原理

- (1) 現在の自車の横位置, 横速度, 横加速度 (状態量) から将来位置を予測
- (2) 現時刻  $t$  における状態量から  $\Delta t$  (予測時間) 後をテイラー展開で推定 (式 (1) 参照)
- (3) 現在の横変位, 横速度, 横加速度から将来位置予測

現時刻  $t_0$  の近傍でテイラー展開:

$$y(t) = y(t_0) + \dot{y}(t_0)(t-t_0) + 1/2 \cdot \ddot{y}(t_0)(t-t_0)^2$$

$t$  (予測点到達時刻)  $= t_0 + \Delta t \rightarrow \Delta t = t - t_0$  を代入

$$y(t_0 + \Delta t) = y(t_0) + \dot{y}(t_0)\Delta t + 1/2 \cdot \ddot{y}(t_0)\Delta t^2$$

左辺の  $z$  変換を  $z^1 \cdot y(t_0)$  とすると.

$$z^1 \cdot y(t_0) = z^0 \cdot y(t_0) + \Delta t \cdot z^1 \cdot \dot{y}(t_0) + 1/2 \cdot \Delta t^2 \cdot z^2 \cdot \ddot{y}(t_0)$$

複素フーリエ変換 ( $z = e^{j\omega}$ ) すると.

$$e^{j\omega} \cdot y(t_0)$$

$$= y(t_0) + \Delta t \cdot e^{j\omega} \cdot \dot{y}(t_0) + 1/2 \cdot \Delta t^2 \cdot e^{2j\omega} \cdot \ddot{y}(t_0)$$

予測到達地点(次の地点)  
 = DC成分 + 1次サブリンク成分 + 2次サブリンク成分  
 (現在地点) (1次予測地点) (2次予測地点)

where,  $\omega = 2\pi/\Delta t$

予見位置  $\hat{R}_l(z)$  の周波数成分を ZOH のサンプリングで実現する.

$$z\hat{R}_l(z) = F\hat{R}_l(z) + h\dot{\hat{R}}_l(z)$$

$$F = e^{At} = 1 \quad (\because A=0)$$

$$h = \frac{1 - e^{-\Delta Ts}}{s} : \text{ZOH}$$

3.3 最適オブザーバによる  $R_l$  の推定

KF は, 線形状態モデルにより, 観測できない状態変数を推定 (オブザーバ) する推定器である.

KF の目的は, 状態方程式に観測値 (イノベーション) を反映・修正し推定精度を向上させるアルゴリズムである.

$R_l$  モデル (状態方程式) はアプリアリに白色雑音で駆動される線形システム (弱定常2次過程) とし, 状態遷移関数  $A < 0$ , 入力として白色雑音 ( $w(t)$ ) を加えた式 (3) になり,  $R_l$  (弱定常2次過程) + 観測雑音 ( $v(t)$ ) を観測値 (イノベーション) としてモデル化できる.

$$\frac{dR_l(t)}{dt} = AR_l(t) + w(t)$$

$$y(t) = R_l(t) + v(t)$$

Where,  $w(t)$ : White noise

3.2 ZOH による予測位置実現

- (1)  $R_l$  は予測距離 (時間) に応じた周波数成分 (PSD) を含む Haptic として生成する.
- (2) 予測距離 (時間) に応じた PSD は ZOH を含むパルス伝達関数で定式化 (式 (2)) する.

今回,  $R_l$  モデルはアプリアリに決定していることにより, 真の状態は推定できないようにしているため, モデル化誤差 (情報を含んだイノベーション) がそのまま  $\hat{R}_l$  となる.  $R_l$  モデルを対象とした最適オブザーバを式 (4) に示す.

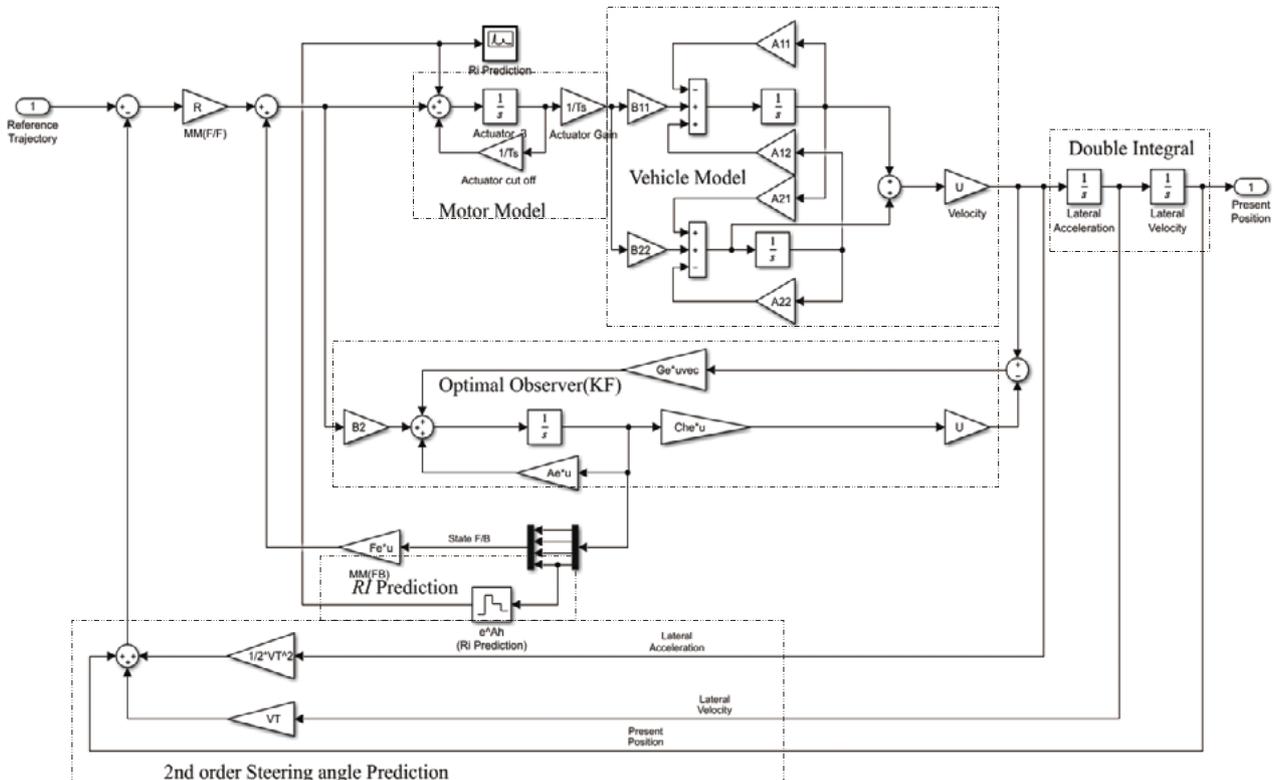


Fig. 3 Mechanization RI Generation Law (Reference)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{R}_l(t)}{dt} &= A\hat{R}_l(t) + PC^T v(t) \\ v(t) &= y(t) - \hat{R}_l(t) \text{--- Modeling Error} \end{aligned} \right\} (4)$$

イノベーション  $v(t)$  は、 $R_l$  モデル（弱定常 2 次過程）とパルス伝達関数  $y(t)$  の差（モデル化誤差）となり推定値  $\hat{R}_l$  と等価になる。（これが、KF と呼ばず最適オブザーバと呼ぶ理由である）

イノベーション  $v(t)$  は、白色性<sup>(8)</sup> となることから弱定常 2 次過程となり  $R_l$  を PSD により評価することは、 $R_l$  モデルの特性を評価することと等価となる。ここで式(2)は式(3)の離散時間表現になっている。

### 3.4 最適オブザーバによる $R_l$ の実現性

最適オブザーバはイノベーション結果の反映による  $R_l$  の推定に対する実現性を有することが確認できた。この結論を反映した RI 発生メカニズムを図 3（前ページ）に示す。

#### (1) 弱定常 2 次過程による $R_l$ モデル

状態遷移行列をアプリアリに虚軸に極めて近い負に選んだ結果、最適オブザーバの  $R_l$  極の収束がプラントの  $R_l$  極より収束が遅いため、収束の時間差がモデル化誤差を生成した結果  $R_l$  と見做す。イノベーション  $v$  は観測値からの  $R_l$  の情報を含んだ白色性となるので、そのモデル化誤差（収束誤差）が  $R_l$  推定値となる。

#### (2) パルス伝達関数による状態遷移関数

状態予測問題<sup>(9)</sup> より、 $h$  時刻先の状態予測  $R_l(t+h)$  は式(5)になる。

$$\hat{R}_l(t+h|t) = e^{Ah} \hat{R}_l(t) \quad (5)$$

式(5)を ZOH によるパルス伝達関数で表すと式(2)と等価となり、式(2)の状態予測問題を定式化したこととなる。

### 3.5 HILS 手動操舵時の離散系操舵方法

車両は US のステア特性であるため、一定半径を維持するためには、速度変化に応じて舵角を可変（速度上昇時：操舵角増加、速度下降時：操舵角減少）する必要がある。

本研究では車両速度を予測時間毎に他動的かつ、離散的に変化させて、ドライバはその速度変化に応じて一定半径を維持するように HILS を手動操舵する方法を採用する。

## 4. Hardware In the Loop Simulation (HILS)

### 4.1 ドライバの予測時間と離散的操舵

#### (1) 予測時間 $\Delta T$

2 次予測舵角制御の場合、2 重積分極（原点）から出発した根軌跡は 2 次予測に対応した 2 つの零点 ( $s = (-1 \pm j) / \Delta T$ ) へ終端する。

この場合、予測時間  $\Delta T$  が極端に小さいと、この零点が

原点から離れるため、原点から出発して根軌跡はガウス平面の右半平面へ入るため不安定となる。今回は参考文献<sup>(10)</sup> の推奨値  $\Delta T = T_d + 1 \text{ 秒} = 1.25 \text{ 秒}$  付近 ( $\because T_d = 0.25$ , ドライバ操舵時定数) を採用する。

#### (2) 離散的操舵のサンプリング周期 $T$

ドライバは操舵修正を連続的に行なうのではなく離散的に行なっているものとする。

従来の人間の伝達のおくれは運転者の離散的な動作のサンプリング周期を  $T$  秒とした場合  $T / 2$  秒と等価になるが、目標値が前方のコースとして与えられている予測時間を目標値とする系であるから、このような離散的操舵モデルのほうが実際に近いと考えられる。今回は参考文献<sup>(11)</sup> の成果  $T > 0.6 \text{ 秒}$  を採用する。

#### (3) HILS に採用した $\Delta T, T$

$\Delta T$  と  $T$  は、異なる性質のものであるが、(1)、(2)の根拠および、ドライバは予測時間に同期して離散的操舵を行っているとの本研究独自の緩和条件から今回の HILS 実験では両者の必要条件<sup>(12)</sup> である下記の値を採用する。

$$\Delta T \equiv T = 1.25 \text{ 秒最大 (0.8 秒, 1 秒, 1.25 秒)}$$

## 4.2 HILS による確認

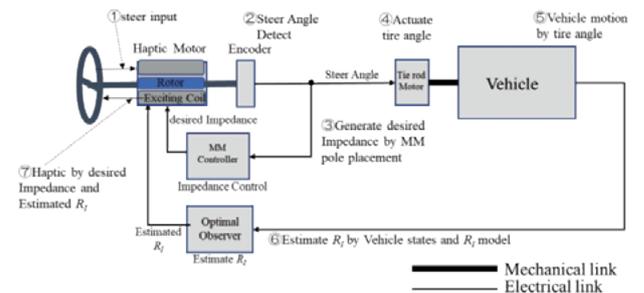
### 4.2.1 HILS 実験装置

HILS に使用した実験装置である次世代知能化技術実験装置 (Next Generation Intelligent Experimental System, NGIES) を図 4、Haptic 発生原理を図 5 に示す。



This equipment is the property of our department on completion 2021.3.

Fig.4 Next Generation Intelligent Experimental System



① to ⑦ indicate the order of occurrence of the sequence.

Fig.5 Principal Diagram on Haptic generation

#### 4.2.2 HILS 実験結果

実際にドライバが HILS に乗車し、下記諸元で操舵した時の Haptic トルクの PSD を離散サンプル時間  $\Delta T = 0.8s, 1s, 1.25s$  の順に図 6 ~ 8 に示す。

図から判るように、Haptic Torque の PSD (周波数成分) が 1.25Hz, 1 Hz, 0.8Hz ( $= 1 / \Delta T$ ) にそれぞれ発生していることが見て取れる。

今回は正式な官能評価以前の筆者および、共同研究者による試行評価であるが、Haptic Torque を入れた時の方が、予測操舵に対応した Haptic 反力を知覚することができ、運転操舵し易いことは明らかに体感できた。

なお、正式な官能評価に備え、既に本学「ヒトを対象とした研究倫理審査委員会」の承認 (工 21-001) を得ている。

- (1) 走行コース：旋回半径30m の定常円旋回
- (2) 走行速度： $65 \pm 15 \text{ km/h}$  ( $18 \pm 4.16 \text{ m/s}$ )
- (3) 車両ステア特性：US
  - ・ホイールベース：2.55[m]
  - ・車両の重心から前輪までの距離：1.07[m]
  - ・車両の重心から後輪までの距離：1.48[m]
  - ・車両質量：1460[kg]
  - ・ヨー慣性モーメント：2050[kg $\cdot$ m $^2$ ]
  - ・前輪 2 輪分のコーナリングステイフネス(線形)：69000[N/rad]
  - ・後輪 2 輪分のコーナリングステイフネス(線形)：92000[N/rad]
- (4) 車両安定化制御：MM (Model Matching) 制御
  - ・制御前の車両極： $-6.8 \pm 5.0 j$
  - ・MM 制御後の車両極： $-14.8 \pm 3.0 j$

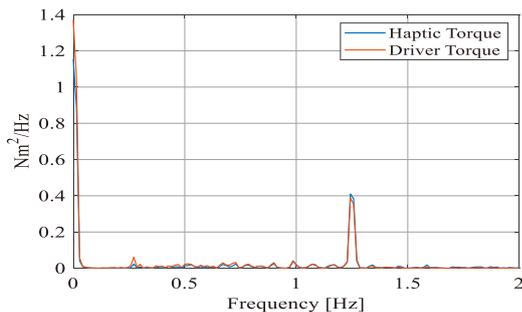


Fig.6 PSD of Haptic torque ( $\Delta T=0.8s$ )

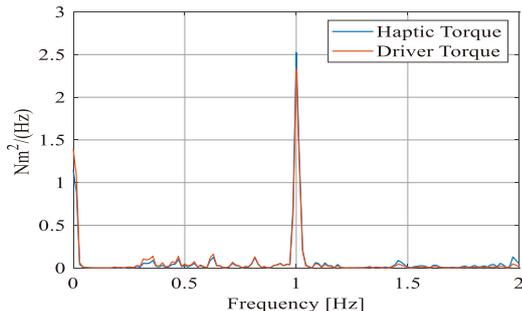


Fig.7 PSD of Haptic torque ( $\Delta T=1.0s$ )

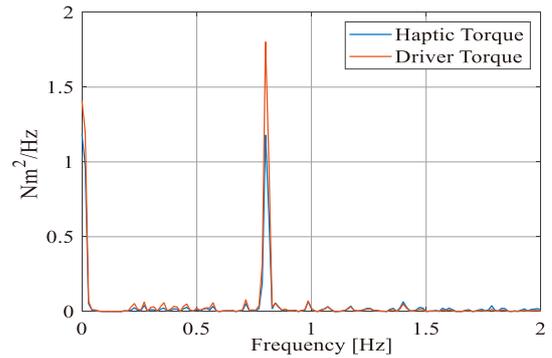


Fig.8 PSD of Haptic torque ( $\Delta T=1.25s$ )

#### 5. 結 言

- (1) 予測地点に向かうための偏向加速度は旋回で生じる遠心加速度に抗するために発生するものであり、ドライバの操舵トルクはこの偏向加速度を生じさせる操作量に相当し、遠心加速度に相当する反力が操作量に抗う反力 (Haptic) となることが HILS において実証できた。
- (2) 状態推定オブザーバの状態予測とドライバの予測操舵モデルを定式化することができた。
- (3) 状態推定オブザーバの状態予測状態を予測操舵トルクの周波数成分 PSD によって表現できることを実証できた。
- (4) ドライバの離散的操舵行動を車両の US ステア特性を利用して、速度を離散的に可変することで実現することができ、HILS での離散的操舵と Haptic の関係を実証できた。

#### 6. 今後の課題

- (1) ドライバは予測時間に同期して離散的操舵を行っているとの本研究独自の緩和条件の妥当性は今後の研究によって検証していく。
- (2) Haptic 感の良否は今後の官能評価に委ねるものとする。
- (3) 本研究の最終目標は自動運転と手動運転をドライバの意図で遷移させるシェアリングコントロールであるので参考文献 (13) ~ (19) 他の先行研究での成果を以下のキーワードで調査・研究して、更なるシェアリングコントロールに対する研究成果の向上・進化を追い求める。

#### <キーワード>

- ・ドライバモデル改善
- ・操舵制御則改善
- ・操舵 Haptic 評価方法
- ・車両 (エージェント) との人馬一体感
- ・自動運転の HMI 原則

## 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、メカトロニクス工学研究科院生 加藤匡剛君ならびに、高浜盛雄先生に感謝申し上げます。

## 文 献

- (1) 佐藤博文, 原口哲之理, 大沢洋: 操舵感に関わる操舵応答特性の考察, 自動車技術 Vol.44, No. 3 (1990) pp.52-58
- (2) 小高賢二, 皆川正明: ステアリングキックバックの原因に関する力学的解析, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1 (1999), pp.119-128
- (3) 毛利宏, 永井正夫, “操舵トルクを制御入力とする車線追従制御の検討 (第1報)”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.67, No.664(2001), pp.160-167
- (4) 田中英之, 栗重正彦, 佐竹俊英, 喜福隆之: 路面反力推定を用いた電動パワーステアリングによる車両安定化制御の開発, 日本機械学会14回交通・物流部門大会講演論文集, 2213(2005), pp.163-166
- (5) 皆木亮, 星野洋, 堀洋一: 運転者の感度特性に基づく反力制御によるアクティブ前輪操舵の実験的検証, 生産研究, Vol.61, No. 6 (2009), pp.19-24
- (6) 高畑健二: シェアードコントロール実現のための人工操舵感の研究, 広島工業大学紀要研究編 Vo.55 (2021), pp.25-30
- (7) 磯村有宏, 原徹, 神谷公一: ドライバのハンドル操作におけるヒューマンファクター-ドライバの操舵特性評価のための三つのパラメータの提案-, 自動車技術会論文集, Vol.27, No.1 (1996), pp.122-126
- (8) 内田健康, 山中一雄: 状態推定の理論, コロナ社 (2021), pp.117-118
- (9) 内田健康, 山中一雄: 状態推定の理論, コロナ社 (2021), p.112
- (10) 藤岡健彦: 前方注視ドライバ・平面二輪自動車系の安定性に関する理論的研究, 自動車技術会学術講演会予稿集 No.11-7 (2007), pp.29-34
- (11) 吉本堅一: 予測を含む操だモデルによる人間自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌 Vol.71, No.596(1968), pp.13-18
- (12) 伊能寛, 戸塚誠司, 深尾隆則, 岡藤勇希: オプティカル・フロー・モデルを利用した操舵制御システムの開発, 自動車技術会論文集 Vo.46, No. 2 (2015), p.443-448
- (13) 小路直樹, 仲出知宏: 自動運転車両における EPS のためのハプティックシェアードコントロール, 自動車技術会学術講演会予稿集 No.115-19(2019), pp.1-6
- (14) 高橋絢也, 秋山悠基, 平賀直樹, 長谷川義二, 山門誠: エキスパートドライバ行動に基づく操舵制御モデルの検討, 自動車技術会論文集 Vol.50, No.1 (2019), pp.102-108
- (15) 山田大介, 村岸裕治, 久代育生, 中澤正和, 小泉瑠璃子, 富田健仁, 澤村浩志: ドライバが知覚する操舵反力の定量化法, 自動車技術会論文集 Vol.47, No. 2 (2016), pp.437-442
- (16) 田中克則, 佐久間壮, 見澤英明, 宮下由佳: 感性工学に基づく Driving Pleasure に関する研究, 自動車技術会論文集 Vol.47, No. 5 (2016), pp.1147-1152
- (17) 大北碧, 二瓶正登, 西山慶太, 澤幸裕: ヒト-ウマインタラクションにおける「人馬一体」感とは何か?, Cognitive Studies Vol.25, No. 4 (2018), pp.392-410
- (18) 向江秀之, 村岸裕治, 小野栄一, 江崎一志, 葉山良平: 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
- (19) 越智徳昌, 金井喜美雄: 制御理論から見た自動操縦, 自動車技術会シンポジウムテキスト No.9905 (1999), pp.14-19