

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

高畑 健二*

(令和2年9月30日受付)

Research on Steering Haptic to realize Shared Control

Kenji TAKAHATA

(Received Sep. 30, 2020)

Abstract

Although the final goal of this research is sharing control, which transitions between automatic driving and manual driving with the driver's intention, this time we focused on the steering feel of the SBW system during that transition.

We have verified the feasibility by the research that a steering reaction force generation control law that allows the user to intuitively understand the intention of the vehicle added information such as the vehicle states side and Road Information to the steering reaction force on the SBW system. In the future, driver assistance technologies that will evolve that autonomous-driving vehicles will be familiar to the driver, will make the driver assistance vehicle or the autonomous vehicle a receptive mobility in a society where senior drivers are increasing.

We would perform a simulation to verify the feasibility of Haptic adding the Road Information, therefore we would report these valuable results.

Key Words: Sharing control, Steer-by-wire, Haptic, Model matching, Impedance Control, Road Information

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⁽¹⁾⁽²⁾として生成される場合や、運転支援モードがシステム都合で遷移した場合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工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。

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に必要な研究と位置付けた。

本研究では参考文献(5)の研究成果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の有効性に注目し、SBWシステムにおける、進路情報（進路に対する操舵反力の時系列的变化）に対する車両（タイヤ）からの操舵応答を周波数成分（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（タイヤ）の状態（反応）を従来の

* 広島工業大学工学部知能機械工学科

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、進路情報(R_I: Road Information)をHapticに反映させる実現性確認のためのシミュレーションによる検証結果、有用な知見および、今後の課題について報告する。

2. SBW車における操舵Haptic

2.1 操舵Hapticの分類

目標進路に向かうための操舵に必要な情報(以下、進路情報)に対する、操舵Haptic(以下、Haptic)との関係は、先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって、以下の分類であると報告されている。

本研究でも先行研究の成果を基準にして、進路情報とHapticの関係について論述する。

- (1) 現在進路保舵(道路形状成分)に対するHaptic
- (2) 予測進路偏向操舵(予測操舵成分)に対するHaptic
- (3) 修正に対する操舵(修正操舵成分)に対するHaptic
- (4) ステアリング・オンセンター保舵に対するHaptic

2.2 Hapticトルク

2.2.1 進路情報に起因するHaptic(分類2.1(1)~(3))

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、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る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。

2.2.2 操舵系構造に起因するHaptic(分類2.1(4))

操舵系の構造(メカニズム)に起因するHapticトルクは操舵角に応じて発生するStiffnessトルク、操舵角速度に応じて発生するMobilityトルク、操舵角加速度に応じて発生するInertanceトルクの線形結合(インピーダンストルク)として表現できる。すなわち、Hapticトルクはドライバの操舵入力を発端として、発生(因果)順に、(1)~(3)が複合されたトルクである。

- (1) 操舵系Inertance(:=操舵角加速度/トルク)に起因するトルク(起動・停止トルク)
- (2) 操舵系Mobility(:=操舵角速度/トルク)に起因するトルク(等速トルク)

- (3) 操舵系Stiffness(:=操舵角/トルク)に起因するトルク(剛性トルク)

この複合トルクは、式(1)のようにインピーダンスの線形結合によって示され、SBWシステムにおいては操舵Hapticトルクを人工的に生成するための原理となる。

$$T_s = J_s \dot{\omega} + D_s \omega + K_s \theta \quad (1)$$

where,

T_s : Synthetic Torque

J_s : Inertance of Steering mechanism

D_s : Mobility of Steering mechanism

K_s : Stiffness of Steering mechanism

さらに、ステアリング・オンセンターにおける手応えは静的特性であり、Stiffnessトルク・操舵角のリサージュ波形における操舵角ゼロ付近のStiffnessトルクのヒステリシス幅で表現でき、図2のように操舵角中央付近での静止操舵トルクの不感帯幅で決定できる。

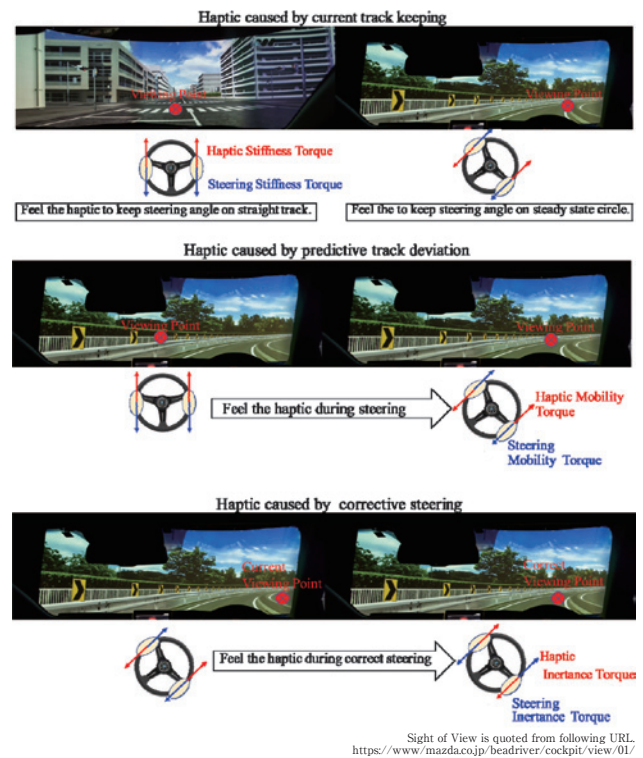


Fig. 1 Road information required for steering Haptic

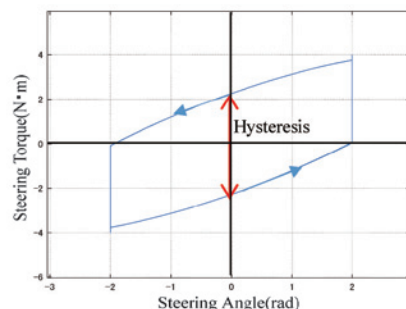


Fig. 2 Hysteresis of Steering on center in Lissajous (Typical)

3. Haptic生成

3.1 Haptic生成則

式(1)で示した操舵系構造に起因するHapticトルクのInertance, Mobility, Stiffnessの混合比率はModel Matching (MM) によるインピーダンス制御により変更することができる。(詳細は3.2節で後述)

一方、維持操舵、予測操舵および、修正操舵の各Hapticについては、タイヤ転舵用のTie Rod モータが内蔵するトルクセンサによって検知した路面から進路情報 (R_t) の周波数成分 (PSD, Power Spectral Density) をMMの極配置のための状態フィードバック要素に拡大系として追加し、ドライバに入力トルクをHaptic成分として重畳させている。(詳細は3.3節で後述)

今回開発した操舵Haptic生成則を確認するためのメカニゼーションブロックを図3に示す。

今回想定したHapticモータは一般的なDCサーボモータである。サーボアンプはトルクセンサであるトーションバーによって機械的入力トルクを電気信号に変換された信号を操作入力とし、MMゲインおよびサーボアンプフィードバックゲインによってHapticモータを制御している。

R_t (Road Information) 信号は最適オブザーバの入力雑音(ただし、雑音として相殺するのではなく重畳信号として扱う。)と見做している。最適オブザーバの観測量はエンコーダによって、モータ出力軸の角度、角速度、角加速度を計測している。このように、Hapticコントローラは最適オブザーバと状態フィードバック則によって構成されている。

なお、SAT (Self Aligning Torque)、路面キックバックに起因するHapticについては、今回対象外とし、今後の研究における研究対象とする。

Hapticの分類とその生成制御則の関係を表1に示す。

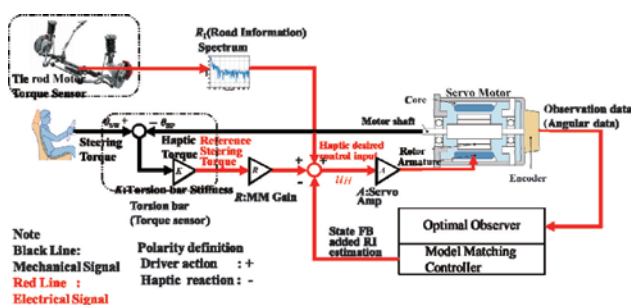


Fig. 3 Mechanization block of Haptic generation Law

Table 1 Generation method for each Haptic

Case / Method	Hold		Predict		Corrective		Note
	Steering	Haptic	Steering	Haptic	Steering	Haptic	
MM Control	Stiffness		Mobility		Inertance		Impedance Control
Optimal Observer		DC Components		Predict Components		Corrective Components	Frequency Shaping
Lissajous Shaping		Hysteresis On center		Gain (Tilt)		Hysteresis Off center	

3.2 MM制御によるインピーダンス制御

3.2.1 インピーダンス成分 J, D, K の抽出方法

操舵系構造に起因するHapticは以下のインピーダンス成分に分類できる。(2.2.2項から再掲)

- (1) 操舵系 Inertance J ($:=$ 操舵角加速度 / トルク) に起因するトルク (起動・停止トルク)
- (2) 操舵系 Mobility D ($:=$ 操舵角速度 / トルク) に起因するトルク (等速トルク)
- (3) 操舵系 Stiffness K ($:=$ 操舵角 / トルク) に起因するトルク (剛性トルク)

これらのインピーダンス成分 (J, D, K) に対する状態変数は、実モータからMM制御に必要な状態変数である角度 θ [rad]、角速度 ω [rad/s]、角加速度 (トルク) $\dot{\omega}$ [rad/s²] を観測データとして計測することができる。角度 θ は、モータのエンコーダ出力より、角速度 ω は、モータドライバ出力より計測することができる。角加速度 (トルク / 慣性モーメント) $\dot{\omega}$ は、状態変数として取り出すために操作量入力に一次遅れ伝達関数を前置し、計測モータ電流にトルク定数を乗算したトルクを $J_m = 1$ とする。

こうすることで、Inertanceに起因するトルクは式(2)に示すように、角加速度と等価になる。さらに、正規化(一般化)インピーダンス⁽⁶⁾は式(3)として表すことができる。

$$T_m = J_m \times \dot{\omega} = I_m \times K_t \Rightarrow T_m = I_m \times K_t \equiv \dot{\omega} \quad (2)$$

$$P(s) = \frac{\alpha_m}{s + \alpha_m} \times \frac{1}{J_m (s^2 + D's + K')}$$

$$= \frac{1}{s + \frac{1}{J_m}} \times \frac{1}{\frac{1}{J_m} s^2 + \frac{D'}{J_m} s + \frac{K'}{J_m}}$$

$$= \frac{1}{s + \frac{1}{J_m}} \times \frac{1}{J s^2 + D s + K}$$

\therefore Normalized impedance ($J_m \equiv 1$)

$$J = \frac{1}{J_m}, D = \frac{D'}{J_m}, K = \frac{K'}{J_m} \quad (3)$$

where,

$P(s)$: Transfer function of Haptic motor (Plant)

T_m : Measurement torque of Haptic motor

$J_m = \frac{1}{\alpha_m}$: Normalized Inertia moment of Haptic motor mechanism

α_m : pole of Haptic motor mechanism

I_m : Measurement current of Haptic motor

K_t : Torque constant

3.2.2 MM制御

MM制御の制御対象であるHaptic生成用のサーボモータを含む操舵系の状態方程式を式(4)、シミュレーション用

パラメータを表2に示す。MM制御とは、制御対象（サーボモータを含む操舵系）に対して、目標指令値 r 、操作量 u 、制御量 y 、状態量 x を規定した上、状態フィードバック則 F および、フィードフォワード則 R によって $r \rightarrow y$ の希望の目標応答を得る制御則である。制御対象のパラメータはハードウェア固有であり基本的に一定（時不変）である。制御対象に対してMM制御を付加し、 F の極配置を任意に変更することによって $r \rightarrow y$ の希望の Haptic 応答を得ることができる。

さらに、 R による定常ゲイン (y/r) は常に1倍 (0dB) となるように設定できる。MM制御を付加した閉ループ制御系（基本制御器）の状態方程式を式(5)に示す。式(4)に示したハードウェア固有の A 行列を式(5)に示すように $A_f = A + BF$ 行列によって、希望のインピーダンスに変更することができるようになり、その結果、希望の Haptic 応答を得ることができる。

Table2 Simulation parameters of Haptic motor mechanism

Parameter : † Nomenclature
J_s : Inertia of Moment of Haptic motor mechanism (Inertance of Steering mechanism)
D_s : Damping Coefficient of Haptic motor mechanism (Mobility of Steering mechanism)
K_s : Stiffness of Haptic motor mechanism (Stiffness of Steering mechanism)
R_a : Armature resistance of servo motor
L_a : Armature inductance of servo motor
K_t : Torque constant of servo motor
K_E : Back electromotive force constant of servo motor
K_a : Current feedback gain of servo motor
i_a : Armature current of servo motor

〈State Equation of Haptic motor steering system〉

$$\dot{x} = Ax + Bu_{Ht} \quad (4)$$

$$y = Cx$$

where,

$$x := \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ \dot{\omega} \\ i_a \end{bmatrix},$$

$$A := \frac{1}{L_a J_s} \begin{bmatrix} 0 & L_a J_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_a J_s & 0 \\ 0 & -(R_a D_s + K_E K_t) & -(L_a D_s + R_a J_s) & K_a K_t \\ 0 & -K_E J_s & 0 & -(R_a + K_a) J_s \end{bmatrix},$$

$$B := \frac{1}{L_a} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C := \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

u_{Ht} : Haptic desired control input
 θ : Motor output shaft(Steering) angle
 ω : Motor output shaft(Steering) angular rate
 $\dot{\omega}$: Motor output shaft(Steering) angular acceleration

〈MM controller〉

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$\text{replace } u := Rr + Fx$$

$$\dot{x} = Ax + B(Rr + Fx)$$

$$= (A + BF)x + BRr$$

$$\therefore \dot{x} = A_f x + BRr$$

where,

$$A_f := A + BF$$

$$y = Cx$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]$$

$$R = -(CA_f^{-1}B)^{-1}$$

f_1 : Feedback gain of angle
 f_2 : Feedback gain of angular rate
 f_3 : Feedback gain of angular acceleration

3.3 進路情報の周波数成分を重畳させる最適オブザーバ

MM制御と最適オブザーバを組合せた拡大システムを図4に示す。図中、 R_I 入力の本래の位置付けは入力外乱であり、それを相殺するように機能するロバスト制御則であるが、今回は相殺ではなく重畳機能として位置付けるため、 R_I 入力の制御量 (Haptic) への影響度に注意を要する。

最適オブザーバの機能は以下のとおりである。

- (1) 進路情報 (R_I) を状態量として、本래の状態フィードバック量 $[\theta, \omega, \dot{\omega}]$ に追加し、拡大系状態量 $[\theta, \omega, \dot{\omega}, R_I]$ を形成する。なお、状態量 i_a (サーボモータ電流) は状態フィードバックには使用しないため、状態量には陽に表記していない。
- (2) 進路情報 (R_I) の最適推定値 (\hat{R}_I) のPSDを最適オブザーバの整形フィルタによって弁別する。
- (3) 進路情報 (R_I) をMM制御の希望応答成分との混合比率 (f_4) を調整することにより、操舵系構造に起因する Haptic 成分に進路情報 (R_I) を重畳させる。

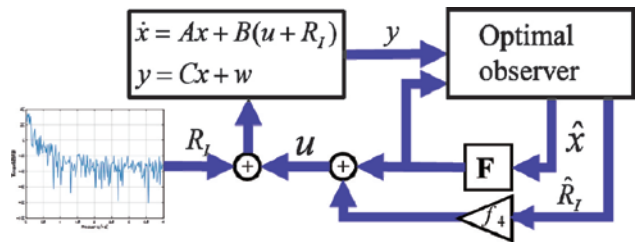


Fig. 4 Optimal Observer system configured by MM control

4. シミュレーションによる実現性の検証

Haptic生成則の実現性について、3章で設計を行った Haptic生成則と R_I を用いてシミュレーションにより検証した。

4.1 ステアリング・オンセンターに対するHaptic

MM制御による操舵トルクと操舵角の周波数応答をリサージュ波形で描き、ステアリング・オンセンターにお

る操舵手応えの評価指標として位相遅れ、ヒステリシス幅について確認した。

下記の解析パラメータによるリサージュ波形(図5参照)の解析により、下記の検証ができた。

〈解析パラメータ〉

- ・操舵入力⁽⁷⁾：正弦波操舵トルク $4N \cdot m_{pp}$ 、角周波数 $1.884/s$
- ・操舵系非線形要素：操舵角飽和
- ・サーボモータを含む操舵系動特性：表2参照

- (1) 操舵トルク(操作量)と操舵角(制御量)の位相遅れはリサージュ波形のヒステリシス幅であり、MMによって位相遅れを補償することでリサージュ波形のヒステリシス幅を任意に変更できる。
- (2) 操舵トルク(操作量)と操舵角(制御量)のゲインはリサージュの傾き(図中ではGain Tilt, Gain Height)であり、MMのフィードフォワードゲインによりリサージュの傾き(ステアリングの操舵ゲイン相当)を任意に変更できるため、フィードフォワードゲインによってステアリングの操舵ゲインを可変することができる。
- (3) 極配置($p_1 = -628, p_2 = -1.57, p_3 = -31.4$, nominal)を複素左半平面上でより左へ配置すると、位相遅れ幅を小さくしヒステリシス幅を小さくすることができる。極配置の数値根拠は現状、試行錯誤値であり、今後、定量的根拠を明らかにする。

極配置(p_1, p_2, p_3)を複素左半平面上でより右へ配置すると、位相遅れ幅を大きくしヒステリシス幅(ステアリング・オンセンターでの手応え相当)を大きくすることができる。

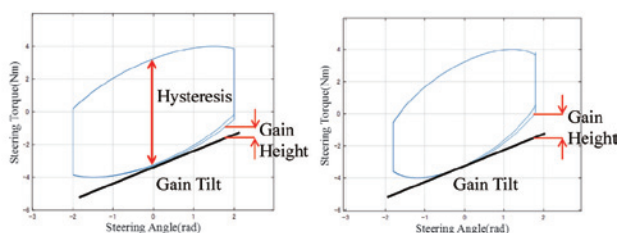


Fig. 5 Lissajous of Steering on center

4.2 PSDによるHaptic検証

R_1 情報のHapticへの反映について、図3に示したメカナイゼーションブロックをシミュレーションによって検証した。図中の R_1 発生器は式(6)の2次予測舵角モデル⁽⁸⁾を使用し、そのテイラー級数展開の第1項(DC成分)を現在進路保持に必要な情報(道路形状成分)、第2項を予測進路偏向操舵に必要な情報(予測操舵成分)および、第3項を修正進路操舵に必要な情報(修正操舵成分)とする R_1 発生アルゴリズムとした。

図6に示すPSDの検証により、 R_1 として操舵1(道路形状成分)に伴う反力1、予測位置へ偏向させるための操舵2(予測操舵成分)に伴う反力2および、外乱修正に対

する操舵3(修正操舵成分)に伴う反力3をHaptic PSD上に明確に再現することができた。図中上側のPSDは式(3)の R_1 生成アルゴリズムで発生させたパワースペクトルである。

図中下側のPSDは最適オブザーバで推定したパワースペクトルである。両者とも非常に類似していることが見てとれる。直流(0Hz)成分は道路形状による成分、1Hz成分は一次舵角予測制御による成分、2Hz成分は修正操舵成分を意味している。なお、3次以上の高調波成分は R_1 発生アルゴリズムの特性上発生するものであり、物理的意味は持たないため、検証対象外とした。

$$\begin{bmatrix} R_{t+1} \\ V_{t+1} \\ A_{t+1} \\ d_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_t \\ V_t \\ A_t \\ d_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1-e^{-\Delta T}}{\Delta} \end{bmatrix} w_t \quad (6)$$

where,

R : Present Position, V : Vehicle Velocity,

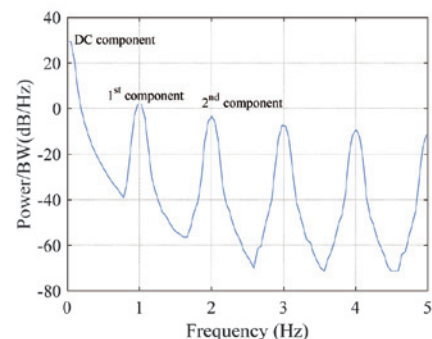
A : Vehicle Acceleration

d : Driving Noise(System Noise),

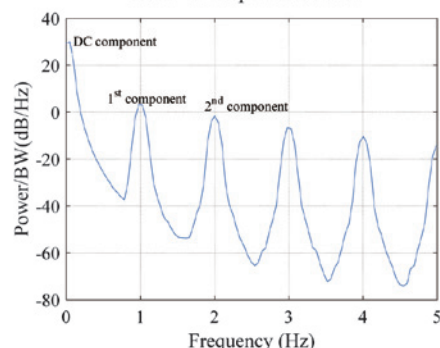
$\Delta := 2\pi / T$ (Sampling Frequency),

T : Prediction Time(Sampling Interval),

w_t : White noise



PSD of Haptic stimulus



PSD of estimated Haptic

Fig. 6 PSD of Road Information

5. 結 言

自動運転での活用を想定したSBW操舵におけるHaptic生成則についてシミュレーションによって以下の検証結果を得ることができ、今後進展予定の研究のための基礎データの取得および、Haptic生成アルゴリズムの実現性を確認することができた。

- (1) R_1 を拡大状態量と見做し、最適オブザーバの推定機能により、 R_1 のHapticへの重畳ができる見通しを得た。
ただし、 R_1 入力の本来的な位置付けは入力外乱であり、それを相殺するように機能するロバスト制御則である点に懸念があるため、今後の理論的解明が必要である。
- (2) MMによる極配置と操舵トルクと操舵角のリサーチ波形（ヒステリシスによる操舵手応え）の関係を把握することができ、 R_1 と操舵手応えを独立に設定することができる見通しを得た。
ただし、現状の極配置の数値根拠は試行錯誤値であり、今後の理論的解明が必要である。
- (3) 今後は、ステアリングシミュレータを用いた官能評価によりHapticとして今回除いたSAT、路面キックバックについても評価し、MMの極配置、最適なパラメータの同定実験を実施し、このアルゴリズムの妥当性を確認していく予定である。
- (4) その後は、実車によるSharing Controllerへの適用を目指し、研究を発展・継続し、このアルゴリズムの妥当性を確認していく予定である。

謝 辞

この論文は [No.20-1] 日本機械学会 2020 年度年次大会講演 [2020.9. 13-16、名古屋] で学術講演するための下記研究論文をまとめるための基礎研究活動における共同研究の一環としてまとめたものである。

さらに、ロバスト制御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、共著者である太田利夫、楊剣鳴、楊孫東、加藤匡剛、張文瀚、布目綾華の皆様ならびに、高浜盛雄先生に感謝申し上げます。

太田利夫*1, 楊剣鳴*1, 楊孫東*2, 加藤匡剛*2, 張文瀚*3, 布目綾華*1: SBWにおけるImpedance制御によるHapticを組込んだSharing Controllerに関する研究

*1: 名城大学理工学部メカトロニクス工学科

*2: 名城大学理工学研究科

文 献

- (1) 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、日本機械学会第14回交通・物流部門大会講演論文集、2213 (2005), pp. 163-166.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 小林尚登、増田良介ほか: ロボット制御の実際 (1999)、コロナ社、pp. 118-124.
- (7) 遠藤修司: "電動パワーステアリングを用いた操舵運転負荷軽減に関する研究"、日本機械学会論文集、Vol. 82, No. 837 (2016), pp. 1-16.
- (8) 高畑健二、松原武徳、奥出宗重: 自動車走行軌跡計測に適用するGPS-IMU融合法の進展、自動車技術会論文集、Vol. 40, No. 1 (2009), pp. 175-180.