

# ロバスト性指標から捉えたドライバモデルの研究

太田 利夫\*・伊藤 大記\*\*・伊藤 良起\*\*\*・高畑 健二\*\*\*\*

(令和6年11月1日受付)

## Research of driver model by the robust index

Toshio OTA, Daiki ITO, Yoshiki ITO, Kenji TAKAHATA

(Received November 1, 2024)

### Abstract

Being many proposals for driver models in the previous research interpreted in various theory (torque control, steering angular velocity control, steering angle control, etc.) for research purposes. Generally, steering angle control has been widely used because the control input to the vehicle model (Plant model) is the steering angle. Additionally, nonlinear elements that cannot be formulated and dead time as a driver model are treated as remnants that cannot be explained by linear control theory. Furthermore, regarding the dead time of the driver model, in a driver model configured on the biomimetics of bat flight maneuver, the dead time is actively inserted into the control law, and is interpreted as a control element for determining the timing of course following. The motivation for this research was the idea that the concept of remnant can be interpreted as a disturbance on broad-definition in linear robust control (uncertainty that cannot be modeled by linear theory, for example, environmental fluctuations, modeling estimation errors, control input by nonlinearity of the actuator, observation noise, and fluctuations of the plant etc.).

In this research, we define remnant as a steering input disturbance<sup>†</sup> (stimulus) and would report the results of verifying whether the concept of remnant is equivalent to broadly defined disturbance in robust control theory returning to a mixed sensitivity problem using sensitivity and complementary sensitivity of the closed loop configured by the Driver In the Loop, which is a design index of robust control performance, and would report the practicality of proposal driver model.

<sup>†</sup>:In this research, the disturbance is not a general disturbance, as it functions as an override to the reference vehicle trajectory.

**Key Words:** Driver model, Sensitivity function, Complementary sensitivity function, Remnant, Input disturbance

\* 広島工業大学 工学部 知能機械工学科

\*\* 元 広島工業大学 工学部 知能機械工学科 (現, 株式会社マツダE & T)

\*\*\* 元 広島工業大学 工学部 知能機械工学科 (現, 三菱自動車エンジニアリング株式会社)

\*\*\*\* 元 広島工業大学 工学部 知能機械工学科

## 1. はじめに

従来からドライバモデルは、数多くの提案<sup>(1)(2)(3)(4)(5)</sup>があるが、それぞれ研究目的のため、いろいろな解釈（トルク制御、操舵角速度制御、操舵角制御等）がされている。中でもビークルモデルへの操作量が舵角であることから操舵角制御が多く用いられてきた。また、ドライバモデルとして定式化できない非線形要素および、むだ時間について線形制御理論では説明できないものとしてレムナント<sup>(6)</sup> (remnant) として扱っている。さらに、ドライバモデルのむだ時間について、コウモリの飛行行動におけるバイオミメティクス (biomimetics) を規範モデルとして構築したドライバモデル<sup>(7)</sup>においては、むだ時間を積極的に制御側へ挿入することで、コース追従タイミングを図るための制御要素と解釈している。

このレムナントの概念は、線形ロボスタ制御における広義の外乱（環境の変動、モデリングの見積り誤差、アクチュエータ操作量の非線形性、観測雑音、制御対象の変動など線形理論ではモデル化できない不確定性）と解釈することができるのではないかというアイデアが研究の動機である。

本研究はレムナントを操舵入力外乱 (Stimulus<sup>†</sup>) として扱い、ロボスタ制御性能の設計指標である Driver In the Loop における閉ループの感度、相補感度特性による混合感度問題<sup>(8)</sup>に帰着させることでレムナントの概念がロボスタ制御における広義の外乱と等価であるかを検証した結果および、ドライバモデルとしての実用性を報告する。

本研究は、MBD (Model Based Design) 手法を適用し MATLAB<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> を MBD ツールとして使用した。

† : ここでの外乱は目標走行軌跡に対するオーバーライドとして機能しているので所謂本来の意味での外乱ではなく Stimulus (システムへの刺激) である。

## 2. ドライバモデルの構築

### 2.1 レムナント (remnant)

今回、目標走行軌跡に対してドライバがオーバーライドする行為をレムナントとして定義する。定義したレムナントを目標走行軌跡に対しての操舵入力外乱として捉えドライバモデルを研究した。

### 2.2 操舵角制御

ドライバは、緩やかなカーブに対して操舵する場合、目標走行軌跡に対する偏差に対し緩慢な低周波域の操舵を行い、さらに目標走行軌跡に対する偏差を角度として検知する操舵角制御を行っていると考えられる。ドライバによる操舵角制御のドライバモデルを図1に示す。図1では、ドライバは車両 (Simple Vehicle model<sup>†</sup>) の制御量である

ヨーレートが緩慢な変化量である場合は、目標走行軌跡に対する偏差を偏角として検知し操舵することを示している。なお、図中の積分器  $\frac{1}{s}$  (Sensing Dynamics) は、ドライバによる操舵履歴の蓄積を示すものである。

† : 本来の制御量は、ヨーレート  $r$  と横滑り角速度  $\beta$  の線形結合であるが、過渡応答の間にしか発生しない  $\beta$  は除外し定常応答であるヨーレート  $r$  のみを制御量とする簡易モデル。

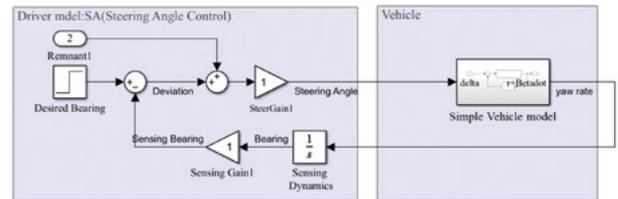


Fig.1 Driver model by Steering Angle Control

### 2.3 操舵角速度制御

ドライバは、スラローム操舵のような急速な交番操舵による急速な変化量である場合は、目標走行軌跡に対する偏差に対し急速な高周波域のステアリング操舵を行い、さらに目標走行軌跡に対する偏差を角速度として検知する操舵角速度制御を行っていると考えられる。ドライバによる操舵角速度制御のドライバモデルを図2に示す。図2では、ドライバは車両 (Simple Vehicle model) の制御量であるヨーレートが急速な変化量である場合は、目標走行軌跡に対する偏差を角速度として検知し操舵することを示している。

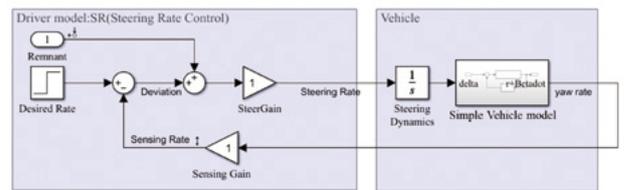


Fig.2 Driver model by Steering Rate Control

### 2.4 複合操舵ドライバモデル

ドライバが目標走行軌跡との偏差に応じて操舵角制御、操舵角速度制御または、複合的操舵を可能なモデルを研究した。2.2節, 2.3節のドライバモデルからレムナントをドライバ操舵入力とした複合操舵ドライバモデル1を図3に示す。

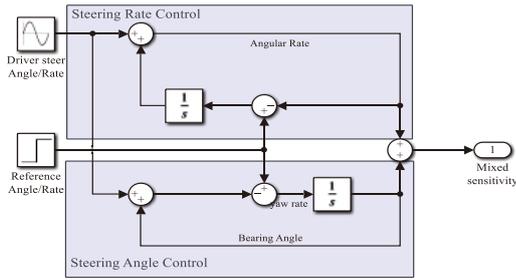


Fig.3 Driver model 1 by combined Steering Angle Control and Steering Rate Control

(1) 操舵角速度制御 (図3の Steering Rate Control ブロック) の周波数伝達特性を図4および、伝達関数を式(1)に示す。図4および、式(1)より高周波域を強調<sup>†</sup>するハイパス特性を示している。ハイパス特性は、ロバスト指標である感度特性とアナロジがあることが確認できる。なお、このアナロジは外乱抑制機能としての感度特性ではなく急速なステアリング操舵の強調機能である。

†: 図3の Steering Rate Control ブロックは急速なステアリング操舵を意味する。

(2) 操舵角制御 (図3の Steering Angle Control ブロック) の周波数伝達特性を図5および、伝達関数を式(2)に示す。図5および、式(2)より低周波域を強調<sup>†</sup>するローパス特性を示している。ローパス特性は、ロバスト指標である相補感度特性とアナロジがあることが確認できる。なお、このアナロジは外乱抑制機能としての相補感度特性ではなく緩慢なステアリング操舵の強調機能である。

†: 図3の Steering Angle Control ブロックは緩慢なステアリング操舵を意味する。

(3) ドライバモデル1 (図3) の周波数伝達特性を図6および、伝達関数を式(3)に示す。図6および、式(3)よりドライバモデルが全域フィルタ (APF, All Pass Filter) として機能していると考えられる。なお、式(3)の不安定零点は、閉ループにおける APF 特性を示すものであり、開ループ伝達関数の不安定零点 (閉ループをかけると不安定極になる) とは特性が異なることに注意されたい。

上記の結果からドライバモデルは、感度特性、相補感度特性による混合感度問題として定式化でき、感度特性、相補感度特性は、外乱抑制機能ではなく外乱 (レムナント) 強調機能として実現している。

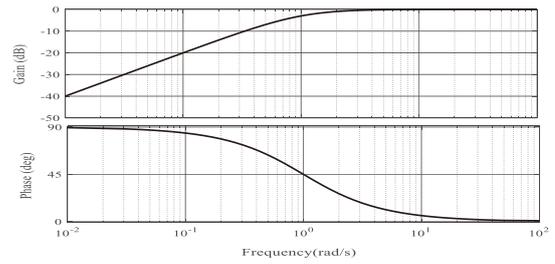


Fig.4 Frequency characteristics of Steering Rate Control of Fig.3

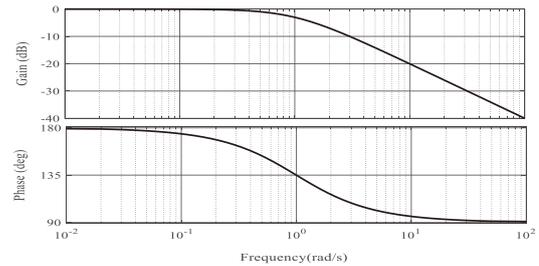


Fig.5 Frequency characteristics of Steering Angle Control of Fig.3

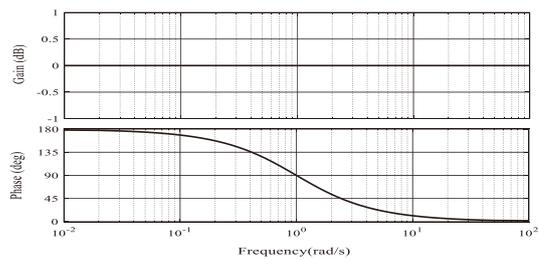


Fig.6 Frequency characteristics of driver model 1 of Fig.3

$$G_{rate}(s) = \frac{s}{s+1} \quad (1)$$

$$G_{angle}(s) = \frac{-1}{s+1} \quad (2)$$

$$G_{driver1}(s) = \frac{(s+1)(s-1)}{(s+1)^2} = \frac{s-1}{s+1} \quad (3)$$

次に、式(1)、式(2)および、式(3)から、ドライバ操舵を入力として図3と等価なドライバモデル2を図7に示す。なお、図7の直達パス (feedthrough pass) は、操作量である入力操舵角および、操舵角速度が直接結合され、混合感度制御量に反映されることから、急速なステアリング操舵の微分操作量が制御量に反映されるように機能するパスである。

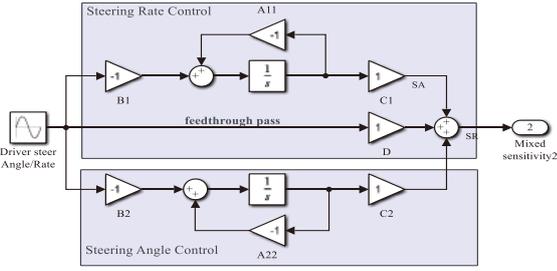


Fig.7 Driver model 2 expressed by Eq.(3)

次に、図7の直達項を含む操舵角速度制御の直達パスの静的な（ラグのない）応答をヒトはできないため、図8に示すようにヒトが微分操舵する動作を模擬した微分ハンドル<sup>(9)</sup>（ $a$ は任意の微分周波数）として機能する1次進みフィルタにより直達パスに代わってラグのあるウォッシュアウト構成にした。

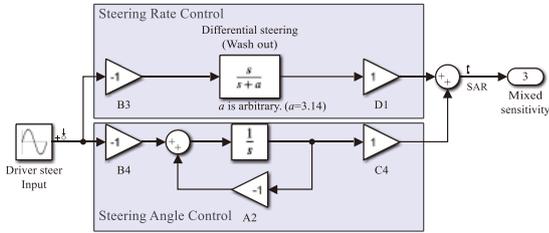


Fig.8 Proposal driver model 3 (typical)

図8に示したドライバモデル3の周波数伝達特性を図9、伝達関数を式（4）に示す。

図9に示したドライバモデルは、APF特性を示し、操舵周波数によって操舵角速度制御（感度特性）・操舵角制御（相補感度特性）を連続的に切り替えることができるドライバモデル3を提案することができた。

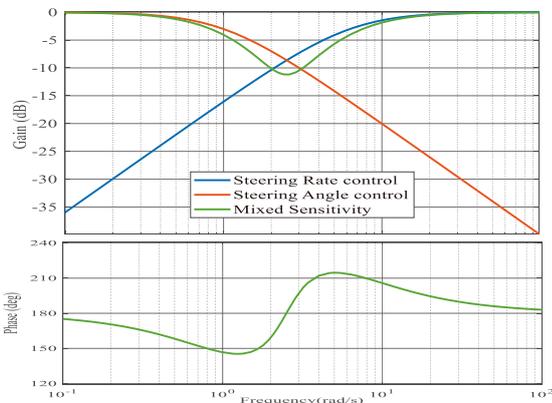


Fig.9 Frequency characteristics of driver model 3 of fig.8

$$G_{driver3}(s) = -\frac{s^2 + 2s + a}{(s+1)(s+a)} \quad (4)$$

where,  $a = 3.14^\nabla/s$

### 3. ドライバモデルの動的評価

2章で構築したドライバモデル3に対して制御対象である線形二輪（ビークル）モデルと組み合わせた状態で、ドライバモデル3の動的な評価を実施した。

なお、使用したシミュレーションブロックを図10、線形二輪モデル諸元を表1、シミュレーション条件を表2、運動方程式（状態方程式）を式（5）に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & -A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (5)$$

where,

$$A_{11} = \frac{2(l_f^2 \cdot C_f + l_r^2 \cdot C_r)}{I \cdot V}, A_{12} = \frac{2(l_r \cdot C_r - l_f \cdot C_f)}{I},$$

$$A_{21} = \frac{2(l_r \cdot C_r - l_f \cdot C_f)}{m \cdot V^2} - 1, A_{22} = \frac{2(C_f + C_r)}{m \cdot V},$$

$$B_1 = \frac{2l_f C_f}{I}, B_2 = \frac{2C_f}{m \cdot V}$$

Table1 Simulation specification of vehicle model

$\delta$ [rad]	Front wheel steering angle	State Variable
$r$ [1/s]	Yaw rate	
$\beta$ [rad]	Side slip angle	
$m$ [kg]	Vehicle mass	1460
$I$ [kgm <sup>2</sup> ]	Yaw inertia moment	2050
$l$ [mm]	Wheel base	2550
$l_f$ [mm]	Distance from CG to Front wheel	1070
$l_r$ [mm]	Distance from CG to Rear wheel	1480
$C_f$ [kN/rad]	Front tire cornering stiffness/ 1 tire	34.5
$C_r$ [kN/rad]	Rear tire cornering stiffness/ 1 tire	46
$V$ [m/s]	Vehicle velocity	16.7

Table2 Simulation conditions of driver model 3

Driver steering input	Single amplitude[rad]	$\pm 0.1$	
	Steering frequency[1/s]		Low
		High	6.28
Differential frequency	$a$ [1/s]	3.14 <sup>∇</sup>	

note  $\nabla$  means arbitrary.

- 図11の時系列波形<sup>†</sup>よりドライバ操舵が緩慢な操舵（ドライバ操舵周波数0.628/s）の場合は、操舵角③の振幅が操舵角速度②の振幅に対して大きく現れており、ドライバモデル3の相補感度特性により操舵角制御が強調されていることが確認できた。
- 図12の時系列波形<sup>†</sup>よりドライバ操舵が急速な操舵（ドライバ操舵周波数6.28/s）の場合は、操舵角速度②の振幅が操舵角③の振幅に対して大きく現れて

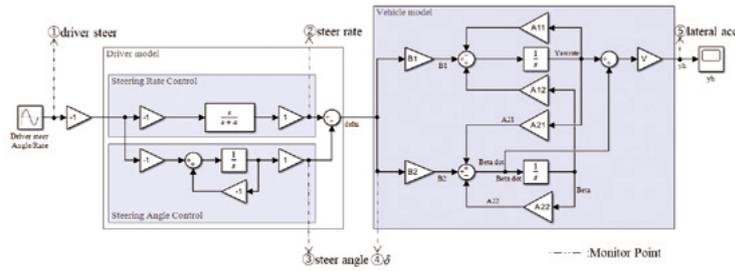


Fig.10 Simulation block diagram of proposal driver 3 model

おり、ドライバモデル3の感度特性により操舵角速度制御が強調されていることが確認できた。

- (3) 上記の結果から、ドライバ操舵をレムナントと置換えた場合の制御量に対する影響を表す感度・相補感度による混合感度問題を適用したドライバモデル3の実用性を確認できた。

†：図中の波形種別は以下のとおり、波形種別は図10のシミュレーションブロックの各計測点と対応する。ドライバ操舵 (① driver steer), 操舵角速度 (② steer rate), 操舵角 (③ steer angle), 舵角 (④  $\delta$ ), 横加速度 (⑤ lateral acc)

ことができる。このノッチ特性は、自転角速度  $\dot{\beta}$  と公転角速度  $r$  が一致した場合に現れる<sup>(10)</sup>。

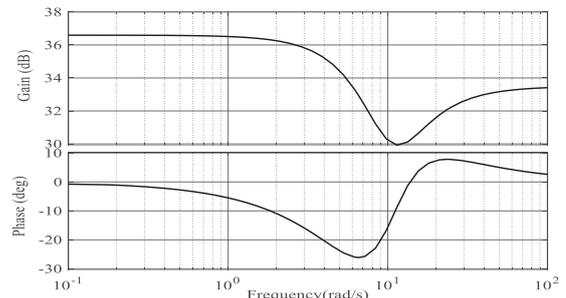


Fig.13 Frequency characteristics of vehicle model

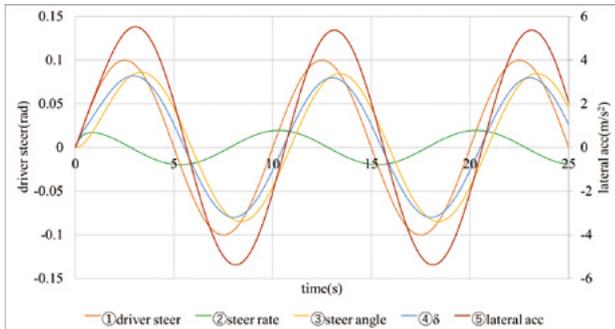


Fig.11 Control output by the driver model 3 (Driver steering input frequency :0.628/s, a=3.14/s)

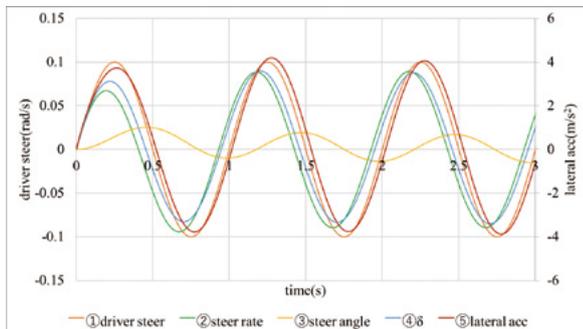


Fig.12 Control output by the driver model 3 (Driver steering input frequency:6.28/s, a=3.14/s)

今回使用したビークルモデルの横加速度 (自転角速度  $\dot{\beta}$  + 公転角速度  $r$ ) × 車両速度  $V$  / 操舵角  $\delta$  の周波数伝達特性を図13に示す。図13よりゲインのノッチ特性を確認する

#### 4. HILS によるドライバモデルの同定

MBD 実験装置 HILS (Hardware In the Loop Simulation) を用いてドライバ (ヒト) による操舵実験結果から同定したドライバ (ヒト) の伝達関数とドライバモデル3の操舵特性 (周波数伝達関数) を比較検証し、ドライバモデル3の実用性を確認した。

今回は暫定的な官能評価試験として被験者4名による試行評価として実施した。なお、この実験は、本学「ヒトを対象とした研究倫理審査委員会」の承認 (工23-001) を得て実施した。

##### 4.1 HILS 実験装置

実験に使用した MBD 実験装置 HILS である次世代知能化技術実験装置 (Next Generation Intelligent Experimental System, NGIES) を図14に示す。視界装置と操舵装置により構成され、実際にドライバが乗車して実操舵と同期した運転視界および、操舵反力を感じさせることが可能な装置である。



Fig.14 Next Generation Intelligent Experimental System HILS (Hardware In the Loop Simulation)

4.2 実験条件

HILSには、3章で使用したビークルモデルを適用した。実験は、表3の実験条件で規定したスラローム走行により実施した。操舵周波数（表3中 Steering frequency）は、車両速度を変化させることで緩慢なステアリング操舵（低周波域）から急速なステアリング操舵（高周波域）の再現模擬を行った。

4.3 実験結果

操作量操舵角に対応する制御量は方位角 $\psi$ ，操作量操舵角速度に対応する制御量はヨーレート $r$ を適用し $\psi/\delta$ ， $r/\dot{\delta}$ の周波数伝達特性を同定した。同定結果（ $\psi/\delta$ ， $r/\dot{\delta}$ ）を図15に示す。本来の制御量は、ヨーレート $r$ と横滑り角速度 $\beta$ の線形結合であるが、周波数伝達特性は定常応答を計測するものであり、過渡応答の間にしか発生しない $\beta$ は除外し定常応答であるヨーレート $r$ のみを計測した。

- (1) 図15において、操舵角 $\delta$ に対する方位角 $\psi$ までの周波数伝達関数（図中 $\psi/\delta_1 \sim \psi/\delta_4$ ）の周波数伝達特性から、低周波域を強調するローパス特性を示している。ローパス特性は相補感度特性とアナロジーがあることから、ドライバは、緩慢なステアリング操舵時に相補感度特性の強調機能を実現していることが検証できた。
- (2) 図15において、操舵角速度 $\dot{\delta}$ に対するヨーレート $r$ までの周波数伝達関数（図中 $r/\dot{\delta}_1 \sim r/\dot{\delta}_4$ ）の周波数伝達特性から、高周波域を強調するハイパス特性を示している。ハイパス特性は感度特性とアナロジーがあることから、ドライバは、急速なステアリング操舵時に感度特性の強調機能を実現していることが検証できた。

この同定結果から、2章および、3章で論述したドライバモデルは操舵周波数帯域によって操舵ゲインを強調する感度特性および、相補感度特性を帯域によって使い分けるとした仮説を混合感度問題として傍証することができ

きた。

Table3 Slalom test conditions

Case	Vehicle velocity [m/s]	Steering frequency [1/s]
1	2.7 (10km/h)	0.28
2	5.6 (20km/h)	0.58
3	6.1 (22km/h)	0.60
4	8.3 (30km/h)	0.93
5	10.8 (39km/h)	1.07
6	11.1 (40km/h)	1.15
7	13.9 (50km/h)	1.49
8	16.7 (60km/h)	1.75
9	18.1 (65km/h)	1.80
10	19.4 (70km/h)	1.94
11	22.2 (80km/h)	2.26

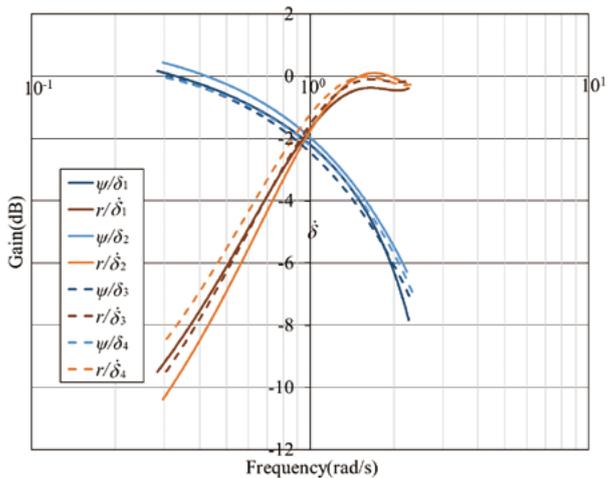


Fig.15 Gain of frequency characteristics by identification

5. 結言

レムナント（ドライバモデルとして定式化できない非線形要素および、むだ時間について線形制御理論では説明できないもの）を操舵入力外乱として定義し、ロバスト制御性能の設計指標である Driver In the Loop における閉ループの感度、相補感度特性による混合感度問題に帰着させることでレムナントの概念がロバスト制御における広義の外乱と等価であることを検証できた。その結果、今回提案したドライバモデルについて以下の知見を得ることができた。

- (1) レムナントを目標走行軌跡に対しての操舵入力外乱 $\uparrow$ として捉えるスキームは感度、相補感度関数に

よる混合感度問題とマッチングすることから、外乱抑制則を強調則として適用できることが確認できた。

†：ここでの外乱は目標走行軌跡に対するオーバーライドとして機能しているので所謂本来の意味での外乱ではなく Stimulus（システムへの刺激）である。

- (2) ドライバ操舵が緩慢な操舵（低周波域）の場合は、目標走行軌跡に対する偏差を角度として検知する操舵角制御が相補感度関数の特性とアナロジーがあることが検証できた。
- (3) ドライバ操舵が急速な操舵（高周波域）の場合は、目標走行軌跡に対する偏差を角速度として検知する操舵角速度制御が感度関数の特性とアナロジーがあることが検証できた。
- (4) ドライバは、目標走行軌跡との偏差に応じて操舵角制御と操舵角速度制御を使い分ける、または複合的に操舵を行っていると考えられることができる。
- (5) 今回シミュレーションしたドライバモデルのケースでは周波数特性において、結果的にノッチ特性が現れた。これは車両の操舵・横加速度の周波数特性のノッチ特性が横加速度とヨーレート（厳密には、自転角速度  $\dot{\beta}$  と公転角速度  $\dot{\gamma}$ ）が一致した場合に現れるノッチ特性とアナロジーがあることを発見した。
- (6) ノッチ特性がある操舵特性と車両特性を同期<sup>†</sup>させることで「人馬一体<sup>(11)(12)</sup>」感を表現できる可能性を示唆することができた。  
†：式（5）の  $A_{21}$ （ヨーレート→横滑り角速度）へのネガティブフィードバックループの形成
- (7) 今回のドライバモデル同定は暫定的な官能評価であり、今後10名以上の被験者による官能評価を計画している。

なお、本研究はMBD（Model Based Design）手法に則り、ドライバモデルの構築（2章）、ドライバモデルの動的評価（3章）および、HILSによるドライバモデルの同定（4章）にはMATLAB<sup>®</sup> /Simulink<sup>®</sup> をMBDツールとして使用した。

## 謝 辞

今回のようなMBDを適用した研究においてMATLABは必須であり、今後もMathWorks社のMBDへの貢献を期待する。

## 文 献

- (1) 三木大輔, 日比元明, 新木亮汰, 狩野芳郎, 安部正人, ステア-バイ-ワイヤの操舵反力要素が操舵特性に及ぼす影響, 自動車技術会学術講演会予稿集(春), pp.1-14 (2013)
- (2) 安部正人, ドライバの車両運動性能評価の新たな視点, 自動車技術, Vol.69, No.7, pp.30-37 (2015)
- (3) 堀内伸一郎, ドライバモデルの使い方, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.06-05, pp.71-78 (2005)
- (4) 堀内伸一郎, ドライバモデル構築の基礎, 自動車技術, Vol.70, No.4, pp.72-77 (2016)
- (5) 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, pp.951-956 (2015)
- (6) 金井喜美雄, ビークル, コロナ社, pp.17-18 (2003)
- (7) 小野 英一, 天野 真輝, 細江 繁幸, 飛龍 志津子, 力丸 裕, コウモリの飛行とドライバ操舵の共通性と統一モデル, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.6, pp.1275-1280 (2011)
- (8) 木村英紀, 藤井隆雄, 森武宏, ロバスト制御 pp.58-60 コロナ社 (2005)
- (9) 例えば, 平尾 収, 安部 正人: 人動車の進路変更特性(微分ハンドルの効用), 自動車技術会論文集, No.1, pp. 89-94 (1970)
- (10) 三田村樂三, 車はなぜ曲がるか?(限界コーナリングのダイナミクス), 山海堂, pp.13-15 (2001)
- (11) 大北碧, 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, pp.392-410 (2018)
- (12) 青山征彦, エージェンシー概念の再検討: 人工物によるエージェンシーのデザインをめぐって, Cognitive Studies, Vol.19, No.2, pp. 164-174 (2012)