

操舵性能の物理特性モデリングと伝達系要素設計に関する考察 (第3報)^{*1}

Strategy for Transfer Elemental Designing and Employing Physical Characteristic Modeling of Steering Maneuvering (the Third Report)

葉山良平 R. HAYAMA 川原禎弘 S. KAWAHARA 中野史郎 S. NAKANO

Our previous report has described a theoretical method for improving steering maneuverability and effectiveness based on the performance of high-efficiency actuator and actual vehicle evaluation. The higher transfer-efficiency is not enough to achieve expected steering maneuver, and other elemental characteristics should be properly established. Steer-by-wire is well known as an innovative steering system that has a potential to create flexible transfer characteristics. This paper describes advantages of the steer-by-wire system to improve steering maneuver and comparison with conventional steering systems along with the evaluation of strategically designing of transfer characteristics for steer-by-wire system.

Key Words: steering system, maneuverability, steer-by-wire, driver-vehicle system

1. はじめに

近年, 基本的なステアリングホイール (以下, SW) 操作に加え, 操舵時の安定感やすっきり感など操舵感に対する要求が高まっている. 運転者は SW を操作・保持する際の操舵力の変化を, 車両挙動と関連付けて官能的に操舵感を評価していると考えられる. そして, 操舵感の向上は, 運転者の負担を軽減し, またドライビングプレジャ¹⁾をも創出することができる.

これまでも, 操舵感向上に向けた多くの研究が報告されている. たとえば, ステアリングアシスト制御特性をシミュレーションで解析的に求める研究²⁾, 車両ロール挙動の目標特性に関する研究³⁾ などである. しかし, それらを実現するための構成部品特性にまで関連付けた設計手法の提案としてはまだ十分でない部分があった.

そこで第1報⁴⁾では, 操舵系の詳細解析モデルを新たに構築し, 構成部品に要求される目標特性を導出する手法について述べた. さらに第2報⁵⁾では, この手法で設計されたステアリングを実車に搭載し, 操舵感に及ぼす影響を評価した. 要素部品の代表的な特性として, 入力トルクの伝達効率を取り上げ, 操舵角に対するヨーレートの応答特性の改善効果を示した. しかしステアリ

ングの伝達効率の改善だけでは, 目標の操舵感を達成できないという課題も認められた. この解決には各要素の最適化だけではなく, 車両システムを考慮した最適化を検討する必要があることを述べた.

本報の2章では, ステアリングシステムを運転者と自動車との間の双方向インタフェースとしてとらえ, その性能について考察する. 3章では, 従来型ステアリングシステムの操舵系伝達構造について述べる. 4章では, ステアバイワイヤ (以下, SBW) システムの操舵系伝達構造について述べ, 従来型ステアリングシステムの場合と比較する. 5章では, ヒューマンマシンインタフェース (以下, HMI) の観点で, 操舵系伝達特性を検討する. 6章では, SBW システムを搭載した車両を用いて, 操舵系伝達特性を評価した結果を述べる.

2. 双方向インタフェースとしての操舵系

従来型ステアリングシステムには, SW とタイヤの間に機械連結が存在している. その伝達構造の一例を図1に示す. 運転者は自車両の目標ヨーレート $\dot{\gamma}$ から, 操舵量としての目標 SW 角 $\tilde{\theta}_h$ を決定し, この $\tilde{\theta}_h$ を達成するための操舵トルク T_h を入力する. この効果が SW, ステアリング機構, サスペンション, タイヤ, 車両へと順次に伝達され, 結果として旋回運動を発生させる.

*1 本論文は, 2009年自動車技術会 秋季大会前刷集 (20095630) を基に作成した.

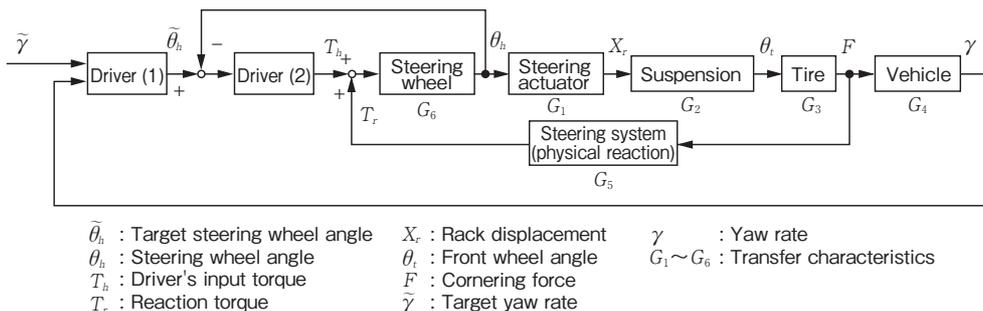


図1 操舵系伝達構造 (従来型ステアリング)
Conventional Steering control on driver-vehicle system

また、タイヤからの反作用力 F は、ステアリング機構により反力トルク T_r に変換されて運転者に伝達される。さらに、車両挙動に関する効果、たとえばヨーレート γ が運転者の感覚器官を介して伝達される。

このように、従来型ステアリングシステムでは、ステアリング機構を介して運転者と車両間における双方向の伝達を行うという特徴がある。

れトルク、変位角、力、変位量を示す。添字は要素部品の位置を示す。

図2に示す通り、SWとラックは、トーションバーや減速機などさまざまな要素を介して機械的につながっている。このため、各要素特性の影響を受けて、SW角 θ_h に対するラック変位 X_r の伝達特性 $G_1(j\omega)$ は複雑なものとなる。

3. 操舵系システムの設計要件

3.1 操舵入力に対する車両挙動特性

運転者から車両への伝達特性について考える。ここでは、パワーステアリングの採用によって反力トルク T_r の影響が小さいとする。運転者からの入力にSW角 θ_h を、車両からの出力にヨーレート γ をそれぞれ選択すると、その伝達特性 $G_\gamma(j\omega)$ は式(1)で示される。

$$G_\gamma(j\omega) = \frac{\gamma(j\omega)}{\theta_h(j\omega)} \tag{1}$$

この伝達特性 $G_\gamma(j\omega)$ は図1において G_1 から G_4 で示した各サブシステムの伝達特性の積として表される。次項以降で、各々の伝達特性について述べる。

3.1.1 SW角 θ_h からラック変位 X_r

図1に示した操舵系伝達構造において、まずSW角 θ_h がステアリング機構に入力され、前輪タイヤ角を駆動するラック変位 X_r が出力される。

$$G_1(j\omega) = \frac{X_r(j\omega)}{\theta_h(j\omega)} \tag{2}$$

従来型ステアリングシステムをモデル化した例を図2⁴⁾に示す。ここでは、大衆車に広く普及しているコラム軸アシスト式電動パワーステアリングを取り上げる。詳細は省略するが I, M は慣性、 K, R, C はそれぞれ弾性、摩擦、粘性を示す。 T, θ, F, X はそれぞれ

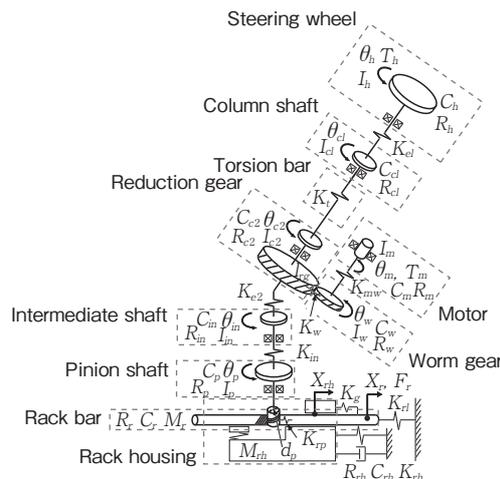


図2 ステアリングモデル (従来型)
Conventional steering model

3.1.2 ラック変位 X_r から前輪タイヤ角 θ_t

ステアリング機構の次に作用する要素はサスペンションである。各リンク部の剛性やジオメトリ設定などに起因して各構成要素が変位する。これに応じてラック変位 X_r に対する前輪タイヤ角 θ_t の伝達特性 $G_2(j\omega)$ が変化する。

$$G_2(j\omega) = \frac{\theta_t(j\omega)}{X_r(j\omega)} \tag{3}$$

3.1.3 前輪タイヤ角 θ_t から前輪タイヤ発生力 F

次の要素であるタイヤについて考える。前輪タイヤ角 θ_t に対するタイヤ発生力 F は、接地面の状態や接地荷重により変化する。さらには空気圧、タイヤトレッドの形状・材料や温度などの多くの要素の影響を受け、その伝達特性 $G_3(j\omega)$ は複雑である。

$$G_3(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{\theta_t(j\omega)} \quad (4)$$

3.1.4 前輪タイヤ発生力 F からヨーレート γ

前輪タイヤ発生力 F を受けて、車両にヨーレート γ が生じるまでの車両特性について考える。タイヤ発生力 F に対して、車両慣性や後輪タイヤ発生力などの影響を受けて、ヨーレート γ が生じる。

$$G_4(j\omega) = \frac{\gamma(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (5)$$

このように、従来型ステアリングにおける、SW 角に対するヨーレートの伝達特性 $G_\gamma(j\omega)$ は、式(1)から(5)で示した G_1 から G_4 の各サブシステムの伝達特性の積で表される。

3.2 車両から運転者への伝達

次に、車両挙動が運転者に伝達される過程について述べる。従来型ステアリングでは、車両から運転者への伝達過程を運転者から車両への伝達と分けて扱うことはできない。しかしここでは、図示表現における便宜上、運転者から車両への伝達特性 G_1 から G_3 とは分けて示す(図1)。

前輪タイヤ発生力 F の反作用力が、ステアリングシステムを介して、操舵反力トルク T_r として SW へ伝達される。タイヤ発生力 F から操舵反力トルク T_r への伝達特性を $G_5(j\omega)$ とする。

$$G_5(j\omega) = \frac{T_r(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (6)$$

タイヤ発生力は車両挙動の元になることから、運転者は操舵反力トルク T_r を車両の状態を予測するための情報の1つとして利用すると考えられる。

また、操舵反力トルク T_r は運転者が入力する操舵トルク T_h に加わり、運転者が操作する SW 角 θ_h に影響を与える。この間の伝達特性を $G_6(j\omega)$ とする。

$$G_6(j\omega) = \frac{\theta_h(j\omega)}{T_h(j\omega) + T_r(j\omega)} \quad (7)$$

このことから、操舵反力トルク T_r は操舵角を介して、運転者から車両への伝達経路に影響を及ぼす。すなわち、伝達特性 G_5 と G_6 は操舵系システムの重要な設計要件となる。

3.3 目標伝達特性の設定

運転者特性を考慮して、車両系の伝達特性 $G_\gamma(j\omega)$ の目標伝達特性を検討する。運転者が車両の運動を制御するとき、図3(a)で示す運転者を含む系において、開ループ伝達特性が図3(b)となることが実験的に示されている^{6~8)}。すなわち、ゲインが0dBとなるクロスオーバー周波数 ω_c 近傍において、その傾きが -20dB/dec 程度となる。運転者の伝達特性 $H(j\omega)$ が無駄時間遅れを含むとすると、開ループ伝達特性は式(8)に示す通り、積分要素として記述できる^{6~8)}。すなわち閉ループにおいて、ヨーレートの偏差が低周波数の領域では、その定常偏差を低減させる特性となる。また、ノイズなどの高周波数の偏差に対しては、ロバストな特性^{6~8)}となる。これらは、運転者-自動車系閉ループの安定性において重要な特性である。

$$H(j\omega)G(j\omega) = \omega_c \frac{e^{-\tau_e j\omega}}{j\omega} \quad (8)$$

ω_c : クロスオーバー周波数

τ_e : 人間の有する無駄時間

また、制御対象である車両系の伝達特性 $G(j\omega)$ に対して、運転者は自身の特性 $H(j\omega)$ を変化させることで図3(b)の特性を実現しようとする。実際には、ステアリングを含む車両系特性 $G(j\omega)$ の非線形性や遅れ特性⁹⁾などに対して、運転者は微分操舵などの補償操作を加えることで車両運動を制御している¹⁰⁾。

この補償操作を減らすために、車両系の伝達特性 $G(j\omega)$ は式(9)で示すような積分に近い1次系とすることが考えられる。これにより、運転者の特性 $H(j\omega)$ は比例ゲインと無駄時間特性のみの式(10)となり、操舵感を向上させる可能性がある。

$$G(j\omega) = \frac{K}{\tau \cdot j\omega + 1} \quad (9)$$

$$H(j\omega) = K_h \cdot e^{-\tau_e j\omega} \quad (10)$$

K : 車両系伝達特性 定常ゲイン

K_h : 運転者 比例ゲイン

τ : 車両系伝達特性 時定数

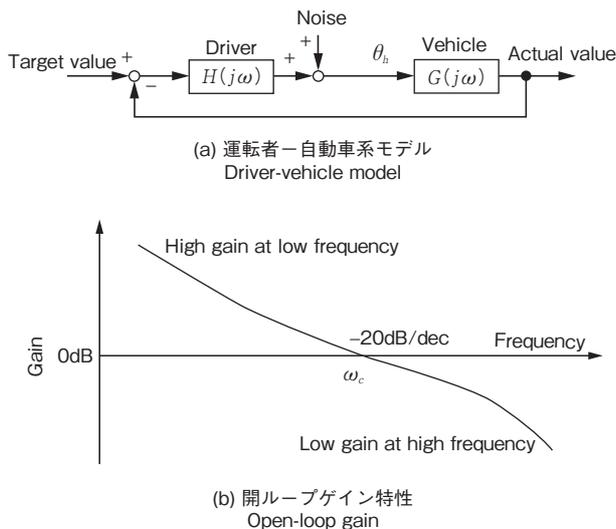


図3 運転者-自動車系伝達特性
Dynamic interaction of driver and vehicle

3.4 従来型ステアリングシステムの伝達特性設計

前述の通り、従来型ステアリングシステムでは、機械連結によって双方向の伝達が同一の機構で行われている。また、機械要素に起因して非線形性や遅れ特性などが必ず存在する。このため、操舵入力伝達されて車両運動が生じるまでの過程において、これらの特性の影響を排除することはできない。したがって、系全体の伝達特性を、独立かつ自由に設定できない構造である。さらに、設計標準や部品共通化などの制約によって、要素部品の特性を最適化することが現実的には難しい。

次章では、操舵系に機械連結がないSBWを用いて、HMIの観点から運転者と車両との伝達特性について検討する。

4. SBWシステムの伝達特性

SBWシステムの概念図を図4に示す。図中の実線は機械的伝達経路を示し、破線は電気的な伝達経路を示している。従来型ステアリングとは異なり、SWとラックとの間で機械的伝達経路がない。SBWを用いた場合の運転者から車両への伝達特性の2つの例を以下に述べる。

4.1 ラック変位制御

図4において、運転者の操作入力であるSW角 θ_h は電気信号に変換されてラック変位制御装置に伝達される。SW角 θ_h の量に基づいて転舵装置を駆動し、ラック変位 X_r をフィードバック制御する。すなわち、制御装置と転舵装置の特性を併せた特性 G_{SBW1} で決まる。

$$X_r(j\omega) = G_{SBW1}(j\omega) \cdot \theta_h(j\omega) \tag{11}$$

本制御の導入により、操舵系の伝達構造は図5に示す通りになる。図1で示した従来型ステアリングとは異なり、図5中の破線部分においては、SW角 θ_h に対するラック変位 X_r は制御によるフィードバック系が構成されている。すなわち、従来型ステアリング機構の伝達特性 G_1 に含まれる非線形性や遅れ特性が制御によって補償される。

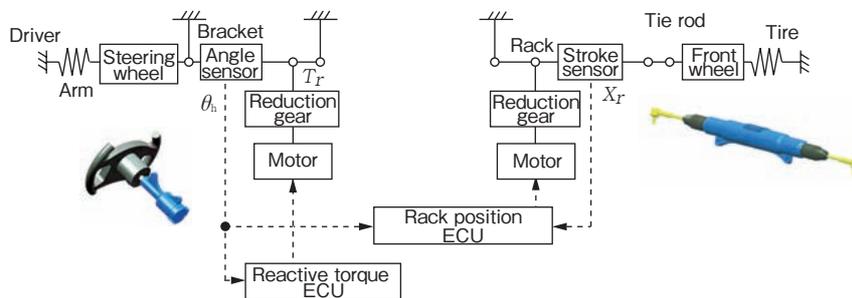


図4 ステアバイワイヤシステム構成概念図
Schematics of SBW system

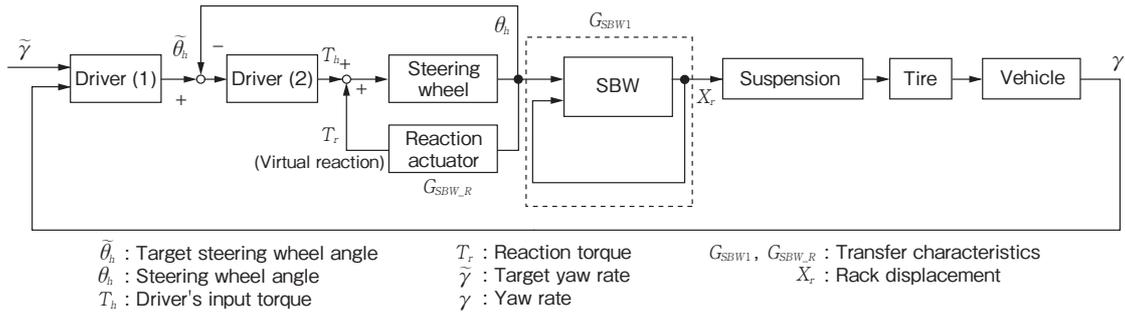


図5 操舵系伝達構造 (ステアバイワイヤ ラック変位制御)

Steering control of SBW system with virtual reaction and rack position control

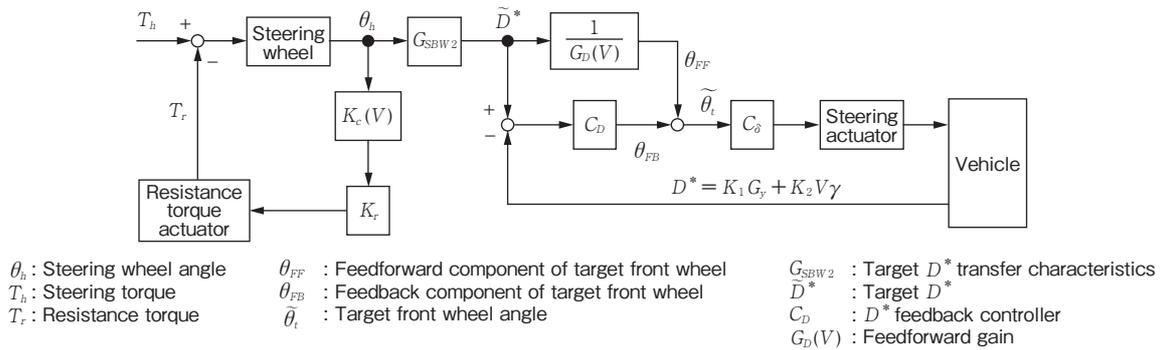


図6 ステアバイワイヤの車両挙動直接制御ブロック図

Control block diagram of SBW D^* control

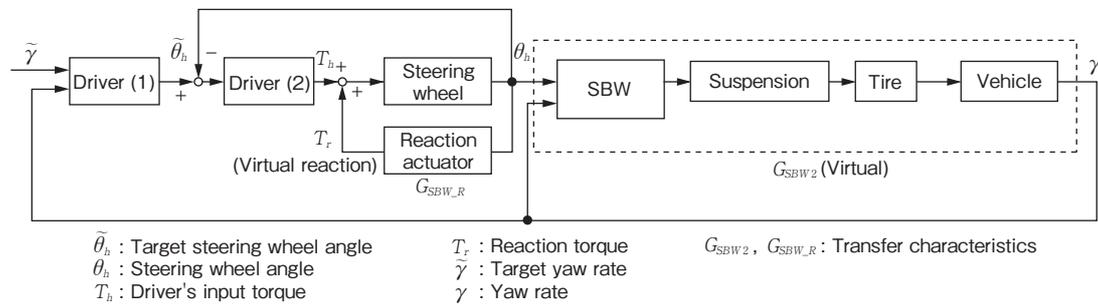


図7 操舵系伝達構造 (ステアバイワイヤ 車両挙動直接制御)

Steering control of SBW system implementing virtual reaction and vehicle control

4.2 車両挙動直接制御

運転者の操舵入力から直接的に車両のヨーレートなどの目標を設定する制御¹¹⁾を考える。本報では、これを車両挙動直接制御と呼び、以下にその一例を示す。車速 V を考慮して SW 角から目標車両挙動指標 \tilde{D}^* を設定する。これに対して、式(12)で示す横加速度とヨーレートの線形和で定義される実 D^* 値をフィードバックする。この偏差に基づいて、前輪タイヤ角をアクティブに制御する。この制御ブロックを図6に示す。

$$D^* = K_1 G_y + K_2 V \gamma \tag{12}$$

K_1, K_2 : 重み係数 (ただし, $K_1 + K_2 = 1$)
 たとえば、ヨーレート为目标値とする制御は、式(12)において $K_1 = 0$ とした場合である。この制御によって、操舵系の伝達構造は図7に示す通りとなる。図1で示した従来型ステアリングとは異なり、図7中の破線で囲んだ部分において、実際のヨーレートがフィードバック制御される。これによって、図1に示したサスペンション、タイヤ、車両の伝達特性 G_2, G_3, G_4 の影響が制御によって自動的に補償される。この結果、運転者は3.3節で述べた補償操作が不要になり、負担が軽減される¹⁰⁾。

$$\gamma(j\omega) = G_{SBW2}(j\omega) \cdot \theta_h(j\omega) \tag{13}$$

5. 操舵系伝達特性の設計

目標の操舵感を達成するため、HMIの観点からSBWを用いてステアリングシステムの伝達特性について検討する。ここでは一例として、第2報と同様に操舵初期の操舵感向上を目的として、SW角 θ_h 入力に対するラック変位 X_r の伝達特性を取り上げる。

SW角 θ_h の入力条件として、図8で示す入力波形を想定する。操舵初期のSW角の漸増時に、SW角速度が速やかに増加し、その後、SW角が正弦波形状へと移行する波形である。

目標の操舵感を達成するための理想的な伝達特性を検討する目的で、次に述べる3種類のラック変位伝達特性(図9)を設計した。

まず、機械結合を持つ従来型ステアリングでは避けることができない非線形性や遅れをなくした特性を考える。この一例として、運転者のSW角 θ_h 入力に対するラック変位 X_r の伝達特性が1次線形である特性Aを考える。(図9実線A)

次に、従来型ステアリングを模擬した伝達特性Bを考える。第2報では、従来型ステアリングの剛性や摩擦特性を、実際上の制約の下で改善した事例を述べた。このときの特性は、機械結合に起因する非線形性および遅れ特性を含んでいる。(図9点線B)

さらに、HMIを考慮した伝達特性を考える。一例として、図3で示した運転者-自動車系における開ループ伝達特性を考慮した伝達特性を考える。ここでは、ステアリングを除く操舵系サブシステム G_2, G_3, G_4 において、ゲイン低下および遅れが小さいと仮定する。この仮定の下では、3.3節の開ループ伝達特性より、ステアリングの伝達特性 G_1 は1次遅れで設定できる。特性Cとして、図8に示す操舵入力条件において、ラック変位伝達特性の傾き変化が -20dB/dec 相当となるように設定した。(図9鎖線C)

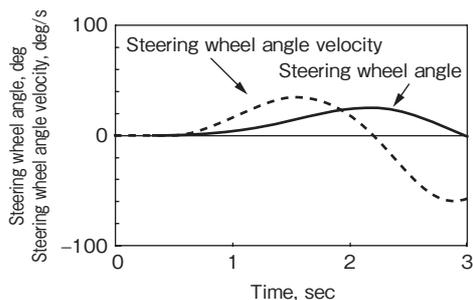


図8 操舵入力条件
Steering input conditions

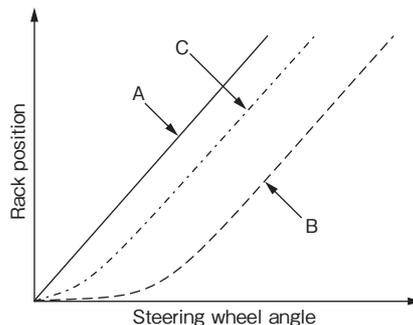


図9 ラック変位伝達特性
Steering transfer characteristics

6. SBW実験車による評価

5章で示した3種類の伝達特性を、SBWシステムを用いて実現し、これを搭載した実験車で官能評価した。走行コースを図10に示す。評価運転者は、車両およびステアリングの評価業務に15年間継続的に従事している1名とした。以下に評価コメントを示す。

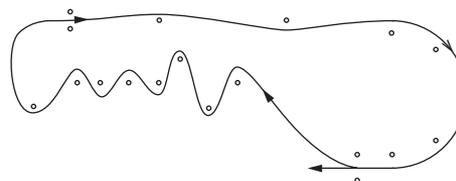


図10 評価コース
Test track for sensory evaluations

特性A：操舵初期から車両ヨー運動が発生する。切り返し時に、発生するヨーレートが大きく、SW角を戻す場面がある。

特性B：操舵初期のヨーレートの発生が小さい。このため、SW角を増す必要がある。目標のヨーレート変化を実現することが難しい場面がある。

特性C：操舵初期から適切なヨーレートが発生する。不要なSW角の戻し操作はなく、走行コースをクリアしやすい。

特性Aの場合、ステアリング系の遅れがなく、操舵初期から十分なヨーゲインが得られる。ただし、運転者の操舵に含まれるノイズ成分にまでもラック変位が過敏に反応するため、運転者は修正操舵が必要になる。

特性Bの場合、操舵初期にヨーレートの発生が小さい。このため、運転者はヨーレートの不足を補うために、

操舵速度を速めるなどの操舵を行う必要がある。さらに、SW 角を増加させる過程において特性の傾きが大きく変化するため、修正操舵が難しい。これが違和感になっていると考えられる。

特性 C では、運転者の操舵に含まれるノイズ成分に対してロバストであり、かつ操舵初期のヨーレートの発生が適切である。このことは、図 3 で示した開ループ伝達特性において適度な速応性、減衰性、定常特性を持つことと同義である。本実験車の特性および HMI 特性が考慮された伝達特性が実現されたと考えられ、3 種類の特性の中では最も評価が高い。運転者が扱いやすい閉ループ・開ループ特性を目標にして設計されたステアリング伝達特性では、運転者は優れた操舵制御を実現できる。本特性が車両の操舵運転特性としても理想的である。

7. まとめ

- (1)機械連結がないSBW では、HMI の観点から理想的なステアリング系伝達特性を制御によって設定できる。一方、従来型ステアリングには、機械連結に起因する非線形性や遅れ特性があり、理想の伝達特性を実現することが難しい。
- (2)SBW 実験車において、3 種類のラック変位伝達特性を設定し、それらの特徴を評価した。
- (3)人間機械共生系の閉ループ制御において、扱いやすい開ループ特性を目標値とした伝達特性によって、優れた操舵感が実現できた。

8. おわりに

ステアリングは、運転者から車両、車両から運転者という双方向インタフェースである。その設計においては、人間の認知・判断・操作に要する遅れ時間特性などとの適合を目指した研究が必要である。SBW は、この研究アプローチに対して、非常に有意義な操舵システムであると考えられる。

次報では、第 2 報で示した設計手法および本報の結果を活用し、従来型ステアリングの操舵感向上の実用化検討事例を紹介したい。

参考文献

- 1) 貴島孝雄：感性重視の車開発，自動車技術，vol. 61, no. 6(2007)50.
- 2) I. Kushiro, S. Koumura, H. Kawai: A New Approach in the Study On-Center Handling, Proceedings of AVEC' 08, no. 20080432(2008)184.
- 3) 武馬修一，矢萩孝志，神田 亮，高橋経範，土居俊一：旋回ロール時のドライバ頭部挙動と操舵行動の解析，自動車技術会学術講演会前刷集，no. 37-09(2009)21.
- 4) 中野史郎，吉元浩司，木村秀司，葉山良平：操舵性能の物理特性モデリングと伝達系要素設計に関する考察（第 1 報），自動車技術会学術講演会前刷集，no. 38-09(2009).
- 5) 木村秀司，中野史郎，國政久郎，両角岳彦，久保愛三：操舵性能の物理特性モデリングと伝達系要素設計に関する考察（第 2 報），自動車技術会学術講演会前刷集，no. 124-09(2009).
- 6) McRuer, D. T., Jex, H. R.: A Review of Quasi-Linear Pilot Models, IEEE Trans, On Human Factors in Electronics, vol. HFE-8(1967)231.
- 7) Duane Mcruer, Richard Klein: Effects of Automobile Steering Characteristics on Driver/Vehicle Performance Regulation Tasks, SAE Paper, no. 760778(1976).
- 8) 藤岡健彦：自動車技術基礎講座 第 4 章 運動性能，自動車技術，vol. 54, no. 11(2000).
- 9) 中野史郎：自動車の操作系要素技術，自動車技術会シンポジウムテキスト(2004).
- 10) 安部正人：車両運動の基礎，自動車の運動と制御，山海堂，(1992)49.
- 11) 中野史郎，西崎勝利，西原 修，熊本博光：ステアパイワイヤにおける操舵制御に関する研究（第 2 報），自動車技術会論文集，vol. 33, no. 3(2002).

筆者



葉山良平*

R. HAYAMA



川原禎弘**

S. KAWAHARA



中野史郎***

S. NAKANO

* 研究開発本部 研究開発センター
電子システム研究部 博士 (工学)

** 研究開発本部 研究開発センター
電子システム研究部

*** 常務執行役員 研究開発本部 博士 (工学)