ステアバイワイヤ車両の転舵応答性評価 と運転者-自動車系の閉ループ解析*

葉山良平** 中野史郎*** 熊本博光† 西原 修††

Evaluation of steer response and vehicle maneuverability of steer-by-wire system

Ryouhei HAYAMA, Shirou NAKANO, Hiromitsu KUMAMOTO and Osamu NISHIHARA

A SBW actuator that applied a conventional EPS motor turns out to yield a large delay of front wheel angle from steering wheel angle as compared with a conventional hydraulic PS. A new concept SBW using a double powered actuator on a lightweight vehicle can demonstrate an equal performance to the hydraulic PS. A closed-loop simulation shows that the decrease of delay is crucial in reducing mental workload for the driver to manipulate SBW.

Key words: steer-by-wire, steer response, vehicle maneuverability, SBW actuator, mental workload

1. 序 論

1950年代においては、自動車の操舵装置の多くはマニュアルステアリングであった。ステアリングホイールと前輪がリンク機構で直結された単純なものであり、運転者は操舵する際に大きな力を要した。その後、運転者の操舵力を補助する油圧パワーステアリング (PS: Power Steering) が登場し、操舵に要する身体的負担が大幅に軽減された。現在では、省エネルギー性の高い電動 PS も普及しつつある。

一方、航空機などで使われているバイワイヤ技術を、自動車に取り入れようとする動きがあり、スロットルバイワイヤやブレーキバイワイヤは既に実用化されつつある¹⁾²⁾。ステアバイワイヤ (SBW: Steer By Wire) では、ステアリングホイールと前輪との間の機械的結合がなくなるので、衝突安全性が向上することや、運転席レイアウト設計の自由度が高まること、さらには運転者の操舵とは独立に前輪を転舵するアクティブステアリングが可能となることなどから、注目を集めている³⁾。

SBW 装置は、基礎技術が確立された PS とは大きく構造が異なるので、どのようにすれば従来の PS と同程度の基本操舵性能を実現できるのかは、不明であった。

油圧 PS から電動 PS への移行は、小型で出力の大きなモータを利用することにより可能になった。電動 PS ではモータは操舵力補助すなわちアシストを担うものであり、運転者は依然として転舵に要する力の一部を分担している。しかし、SBW においてはそのような分担はないので、油圧 PS と同程度の性能を発揮するには、単なる電動 PS 用モータの転用では不十分となる恐れがある。

そこで本稿では、油圧 PS と同等の性能を得るために、SBW アクチュエータにおいて、どの程度のモータ出力が必要かという問題を考える。同時に、SBW アクチュエータに油圧 PS 水

準の性能が必要とされるかという問題を考える。2 節では、電動 PS 用モータを転用した SBW アクチュエータ (以下簡易型 SBW と呼ぶ) を用いて、油圧 PS と性能を比較する。3 節では、転舵応答性と耐故障性の向上を目指した新しい SBW (以下改良型 SBW と呼ぶ) を軽量車両に搭載し、車両重量が及ぼす影響と、アクチュエータ出力を倍加した場合の性能を検証する。応答性能と運転者が操舵するときの精神的負担などとの関係を 4 節で明らかにする。

2. 簡易型 SBW

2.1 概要

SBW の構成例を図1に示す。運転者のステアリング操作を監視する操舵角センサ 1、転舵力を実現する転舵アクチュエータ 2、操舵角センサ信号と前輪転舵角センサ 3からの信号を基に、転舵アクチュエータを制御する制御装置 4 からなる。センサ信号としてはこの他に車速、車両横加速度、ヨーレート 5

Fig. 1 SBW system construction

* 原稿受付 平成 18 年 1 月 30 日

** 正 会 員 (株)ジェイテクト (奈良県橿原市十市町 333)

*** (株)ジェイテクト

† 正 会 員 京都大学大学院 (京都府京都市左京区吉田本町)

†† 京都大学大学院

- T_h : Steering wheel torque
 T_r : Reactive torque
 δ_h : Steering wheel angle
 v : Vehicle speed
 $K_\delta(v)$: Steering wheel angle to front wheel angle gain
 δ^* : Reference front wheel angle
 δ : Actual front wheel angle
 $C_\delta(s)$: Front wheel angle controller
 $K_r(v)$: Steering wheel angle to reactive torque gain
 T_r^* : Reference reactive torque
 s : Laplace variable

Fig. 2 Basic control diagram

を用いる。操舵角と前輪転舵角との関係を自由に設定することができ、転舵レシオ可変制御やアクティブ操舵制御を用いて、高度な車両運動制御が実現可能となる。

図1では、故障時に機械的連結を復活させて安全性を確保するという、フェールセーフ装置6を設けている。しかし、この連結機構のため、SBWの利点である衝突安全性の向上と運転席レイアウト設計の自由度向上は、制約されることになる。

なお、反力アクチュエータ7は操舵反力を発生させるためのものである。

2.2 基本制御

SBWの制御ブロックの例を図2に示す。前輪転舵角 δ をホイール角 δ_h に比例した値 $\delta^* = K_\delta(v)\delta_h$ へと追従させる。仮想的なギヤ比 $K_\delta(v)$ は車速 v の関数として自由に設定でき、従来の可変ギヤ比減速装置のような機械的制約はない。

同様に、ある操舵角において、車速に応じた操舵反力 T_r を発生させる。

2.3 性能比較

電動PS用モータを転舵アクチュエータ2に転用した簡易型SBW実験車を試作し、その性能評価を行った。搭載した車両は1800ccフロントエンジンの前輪駆動車である。

車速11.1m/sで走行中に、振幅 $\pm 1\text{rad}$ 、操舵周期0.3Hzの正弦波状の操舵を行った時の操舵角、車両ヨーレートの時系列波形を図3に示す。本図より、簡易型SBWでは操舵角に対する車両ヨーレートの応答に遅れが生じていることが分かる。同走行時の前輪転舵角の時系列波形を図4に示す。操舵角に対して前輪転舵角の応答が遅れていることが分かる。このことから、前輪転舵角の応答遅れが車両ヨーレートの応答遅れの主要因であると推察される。車両ヨーレートの応答遅れは、運転者-自動車系の挙動を不安定にする恐れがある

Fig. 3 Time delay of vehicle yaw rate (previous concept SBW)

Fig. 4 Time delay of front wheel angle (previous concept SBW)

Fig. 5 Swept sine wave

Fig. 6 Phase curve (previous concept SBW)

Table 1 Time constant and gain (previous concept SBW)

Item	Time constant τ_s	Gain K
Hydraulic PS	0.010 sec	0.07
Previous concept SBW	0.130 sec	0.07

ので、前輪転舵角応答は重要な性能指標である。

そこで、従来の油圧 PS と簡易型 SBW との転舵応答性能を周波数領域で比較評価するため、実験車における操舵角から前輪転舵角への周波数特性を求めたこととした。

車速 11.1m/s で走行中に試験者によって図5 に示すスイープ正弦波形状の操舵入力を行い、その時の前輪転舵角を計測した。入出力の時系列データをフーリエ変換し、スペクトルを求め、操舵角と前輪転舵角との間の伝達関数の位相を求めた⁴⁾。

得られた位相曲線を図6 に示す。同図より、黒三角の従来の油圧 PS に比較して白三角の簡易型 SBW では、大きな位相遅れが生じていることが分かる。本比較評価結果より、電動 PS 用モータと同等出力の SBW アクチュエータでは、十分な操舵基本性能が確保できないことが分かった。

また、図6 の位相曲線より、比較に用いた油圧 PS アクチュエータおよび簡易型 SBW の転舵アクチュエータの特性は次の通り 1 次遅れ特性で近似できることが分かる。図中の鎖

Fig. 7 New concept SBW system construction

線は簡易型 SBW に対する 1 次遅れの位相曲線、実線は油圧 PS に対する 1 次遅れの位相曲線を示す。

$$\delta = \frac{K}{\tau_s s + 1} \delta_h \quad (1)$$

ただし、記号は下記である。

- δ : 前輪転舵角
- δ_h : 操舵角
- K : 操舵角ゲイン
- τ_s : 転舵アクチュエータ時定数

時定数 τ_s とゲイン K はそれぞれ表1 に示す通りである。油圧 PS に比べて簡易型 SBW では、時定数が 10 倍以上大きい値となっている。なお、ゲインは定常状態の入出力比から求めるものである。

3. 出力を倍加した改良型 SBW

3.1 概要

前節で示した SBW 車両では、転舵アクチュエータの出力が搭載車両に対して低かったことから、十分な操舵基本性能が得られなかった。従来の PS において油圧もしくは電動モータが行う仕事は運転者の操舵力の補助であった。アクチュエータの遅れなどのため、過渡的には PS の補助力が大きく不足し、運転者の操舵力に依存する場合が生じる。

SBW においてはこのような場合も考慮し、従来の PS と比較して、アクチュエータ出力の増加が必要であると思われる。

そこで、転舵応答性の向上を目的に、前節で示した簡易型 SBW と同等出力のモータを 2 個用い、アクチュエータの出力を倍加した改良型 SBW システムを製作した。図7 にその構成を示す。

簡易型 SBW と同様に操舵角センサ 1、転舵アクチュエータ 2、前輪転舵角センサ 3、制御装置 4、5 からなり、それぞれを冗長構成とすることによって、単一故障では運転不能に陥らない、耐故障性を有する構成とした⁵⁾。左側の転舵アクチュエータが故障した場合でも、右側のみで前輪を転舵することもできる。

Fig. 8 Time delay of vehicle yaw rate (new concept SBW)

Fig. 9 Time delay of front wheel angle (new concept SBW)

Fig. 10 Phase curve (new concept SBW)

簡易型 SBW と同様に、センサ信号としてはこの他に車速、車両横加速度、ヨーレート 6 を用いる。また、操舵反力を発生させる反力アクチュエータ 7、これを制御する反力制御装置 8 からなる。

さらに今回は、モータの収容場所を確保するため、前輪荷重が約 1/2 である 1800cc のリアエンジンの後輪駆動車に改良型 SBW を搭載した。なお、これに伴って明らかとなる、前輪荷重の影響も言及する。

3.2 性能比較

3.2.1 実験結果

簡易型 SBW と同様に車速 11.1m/s で振幅 ± 1 rad、操舵周期 0.3Hz の正弦波状の操舵を行った時の操舵角、車両ヨーレートの時系列波形を図 8 に、同走行時の前輪転舵角の時系列波形を図 9 に示す。

Table 2 Time constant and gain

Item	Time constant τ_s	Gain K
Hydraulic PS	0.010 sec	0.07
New concept SBW (two motors)	0.010 sec	0.07
New concept SBW (one motor)	0.024 sec	0.07
Previous concept SBW	0.130 sec	0.07

Fig. 11 Simulation model

次に、前節と同様の方法によって求めた位相曲線を図 10 に示す。図中の黒丸は 2 つのモータを同時駆動した場合、白丸は片側のモータだけを駆動した場合を示す。比較のため、油圧 PS の 1 次遅れ特性での近似結果を実線で示す。また、図 6 の簡易型 SBW の場合の結果を白三角で示す。

前節と同様に転舵アクチュエータの特性は 1 次遅れ特性で近似でき、その時定数およびゲインは表 2 となる。比較のため、油圧 PS および簡易型 SBW の時定数とゲインも併記する。

3.2.2 片側モータのみを駆動させた場合の評価

改良型で 1 モータ駆動の場合、表 2 より、簡易型 SBW と比べて時定数が 1/5 以下であり、前輪荷重の軽量化によって位相遅れが格段に向上できることがわかる。

次に同じ前輪荷重の後輪駆動車に対してアクチュエータ出力を倍加した場合の影響を考える。

3.2.3 両モータを駆動させた場合の評価

図 8, 9 より、前輪荷重が大きくて、非力な簡易型 SBW と比べて前輪舵角とヨーレートの応答遅れが大きく改善できている事が分かる。

また、図 10 と表 2 より、油圧 PS 特性と同等の転舵応答性能が確保できることがわかる。これより、出力を倍加した場合は油圧 PS と同じ時定数で近似できることが分かる。

すなわち、前輪荷重を減少させアクチュエータ出力を倍加させれば、前輪荷重の大きな油圧 PS と同等の性能が発揮できることが分かった。このことは、前輪荷重の大きなフロントエンジン前輪駆動車に対しても、アクチュエータ出力を倍加以上に増強することにより、油圧 PS と同程度の性能を発揮できるということを示唆している。

4. 閉ループ評価

4.1 人間を含む閉ループ評価の必要性

ここまでは、操作者である人間の特性を考慮せずに機械系の特性のみの評価を行ってきた。しかし、実際の運転環境では人間を含めた系で車両運動が成り立っている。操舵装置は運転者と車両とを結ぶ重要なインタフェースであり、運転者—自動車系の評価が必要である。

4.2 運転者モデル、操舵装置モデル、車両モデル

前輪転舵角応答遅れ特性の運転者操舵行動への影響を調べる。定量的に評価するため、図 11 に示す運転者—自動車系のモデルを用いた。

4.2.1 運転者モデル

運転者モデルには、式 (2)、(3) の前方注視点モデル⁶⁾を用いた。運転者は前方注視点の車両目標軌跡からの横変位、すなわち前方注視誤差 ε を基に操舵角 δ_h を出力するものとし、その伝達関数 $H(s)$ は運転者の操舵に対するむだ時間 τ_L を含む微分動作と比例動作の和とした。

$$\delta_h = H(s)\varepsilon \quad (2)$$

$$H(s) = h(\tau_D s + 1)e^{-\tau_L s} \quad (3)$$

ただし、記号は下記である。

- h : 運転者の比例ゲイン
- τ_D : 運転者の微分ゲイン
- τ_L : 運転者のむだ時間
- δ_h : 操舵角
- ε : 前方注視誤差

4.2.2 転舵アクチュエータモデル

転舵アクチュエータモデルは、基本的な転舵装置性能を評価する目的から D^* 制御などの車両姿勢安定化制御⁸⁾を含まない、操舵角比例型前輪転舵角制御を用いた。ここで、操舵角入力 δ_h に対する前輪転舵角 δ の特性は前節で示した通り、表 2 の時定数 τ_s を持つ 1 次遅れで近似した。操舵角ゲイン K は、定常時における操舵角 δ_h に対する転舵角 δ の比であり、定常的な入出力比から決まる。

$$\delta = \frac{K}{\tau_s s + 1} \delta_h \quad (4)$$

4.2.3 車両モデル

前後輪のコナリングフォースによる車両の左右並進運動、ヨー回転運動を簡易的にモデル化した 2 輪モデル、すなわち次の式 (5)、(6) を用いた⁷⁾。前後輪コナリングフォース F_f, F_r は式 (7)、(8) に示す通り、各輪の横滑り角に比例するとした。添え字 f は前輪、 r は後輪である。

$$mv(\dot{\beta} + \gamma) = 2F_f + 2F_r \quad (5)$$

$$I_z \dot{\gamma} = 2l_f F_f - 2l_r F_r \quad (6)$$

$$F_f = -K_f \left(\beta + \frac{l_f \gamma}{v} - \delta \right) \quad (7)$$

$$F_r = -K_r \left(\beta - \frac{l_r \gamma}{v} \right) \quad (8)$$

ただし、記号は下記である。

- m : 車両質量
- v : 車速
- β : 車両横滑り角
- γ : ヨーレート
- F_f, F_r : 前後輪コナリングフォース
- I_z : 車両ヨー慣性モーメント
- l_f, l_r : 重心点から前後輪軸までの距離
- K_f, K_r : 前後輪コナリングパワー

4.3 評価タスク

図12に示すように、車幅 3.5m の道路を車速 11.1m/s で走行中の緩やかな車線変更をタスクとした。計算機シミュレーションによりタスク遂行時の操舵角を求めた。

Fig. 12 Task of closed-loop simulation

Table 3 Model parameter of standard driver

Parameter	Value
Proportional steer gain of driver : h	1.62
Derivation steer gain of driver : τ_D	0.2

Fig. 13 Steering wheel angle output (new concept SBW)

Fig. 14 Steering wheel angle output (previous concept SBW)

Fig. 15 Steering wheel angle output (parameter optimized)

Table 4 Model parameter of exceptional driver

Parameter	Value
Proportional steer gain of driver : h	0.76
Derivation steer gain of driver : τ_D	0.65

4.4 運転者適合パラメータ

運転者モデルパラメータ h , τ_D を、表3の標準的な値に固定した。それぞれの転舵アクチュエータ時定数の場合について、運転者モデルの出力である操舵角 δ_h を比較した結果を図13, 14に示す。図13の実線は油圧PSと改良型SBW(2モータ)の操舵角、破線は改良型SBW(1モータ)の操舵角であり、これらはほぼ一致している。油圧PS搭載車両から改良型SBW搭載車両へ乗り換えても、運転者は違和感なく操舵操作可能であると予測できる。

これに反して、図14の鎖線で示す時定数 τ_s が0.130sec, すなわち簡易型SBWの場合、表3のパラメータを仮定する限り、実線の油圧PSと比べて振動的な操舵角入力を行わなければ、タスクを遂行出来ないことが確認できた。単純な車線変更において、簡易型SBWのような操舵角入力を必要とする操舵装置は実用的ではない。

次に、簡易型SBWにおいて、油圧PSと同等の走行軌跡を実現でき、かつ同様の操舵入力となるように、運転者モデルパラメータ h , τ_D を試行錯誤的に求めた。操舵角を図15に、運転者モデルパラメータを表4に示す。簡易型SBWにおいて油圧PSと同様の操舵入力で車線変更タスクを実現するためには、比例ゲイン h を約0.47倍に減少させ、運転者の微分ゲイン τ_D を約3.3倍に増加させる必要がある。運転者はより予測的な動作を行い、さらに小さな操舵角を高い精度で入力しなければならず、運転者にとっては操舵に要する精神的負担などが大きくなる。

5. 結 言

- (1) 従来の電動PS用モータをアクチュエータに転用した簡易型SBWでは、油圧PSと比較した場合、転舵応答性が著しく劣化する。SBWでは運転者の操舵力の転舵機構への直接的な作用がないためである。

- (2) 同程度の出力のSBWアクチュエータを軽量車両に用いると、油圧PSとの性能差を狭めることができ、モータ出力を倍加したSBWでは、重量車両の油圧PSとほぼ同等の性能を発揮できる。
- (3) 油圧PSからの応答性の劣化度合いが大きい簡易型SBWでは、運転者は比例ゲインを減少させ、微分ゲインを増加させる必要があり、操舵に要する精神的負担などが大きくなる。
- (4) SBW装置においては、PSに比べて大きな出力をもつモータ、もしくは車両の軽量化が要求される。

本研究では、リアエンジンの後輪駆動車に改良型SBWを搭載したが、前輪荷重の大きいフロントエンジンの前輪駆動車などに搭載した場合のモータ出力増強の詳細、および運転者の精神的負担に関する実証的研究が今後の課題として考えられる。

参 考 文 献

- 1) 自動車の操縦安定性向上技術に関する特許出願技術動向調査、特許庁 (2001).
- 2) 金井喜美雄：自動車のドライブバイワイヤ-航空機との共生、自動車技術, **58**, 5(2004) 80.
- 3) 本山廉夫：ステアバイワイヤと車両運動制御、自動車技術, **57**, 2(2003) 39.
- 4) 本田昭他：サーボ制御の理論と実践、日刊工業新聞社 (1995) 11.
- 5) G. Zuo et al.: Quantitative reliability analysis of different design alternatives for steer-by-wire system, Reliability Engineering and System Safety, **89**(2005) 241.
- 6) 古川修：操縦安定性の歴史、自動車技術, **41**, 3(1987) 307.
- 7) 安部正人：自動車の運動と制御、株式会社山海堂, (1992) 55.
- 8) 中野史郎 他：ステアバイワイヤにおける操舵制御に関する研究、自動車技術会論文集, **31**, 2(2000) 53.