

ステアバイワイヤにおけるマン - マシンインタフェースとしてのステアリングホイール制御則の研究

A Research on Steering Wheel Control Strategy as a Man-Machine Interface for a Steer-by-Wire System

木村秀司 S. KIMURA, 瀬川雅也 M. SEGAWA, 嘉田友保 T. KADA, 中野史郎 S. NAKANO

The steering reactive torque control is a keen subject to improve operationality in SBW (steer-by-wire) system and maneuverability by utilizing the feature of SBW.

The research described in this paper aims at realization of steering feeling harmonized with vehicle behavior, as well as establishment of the reactive torque control logic that can be applied to any kind of vehicles. The control logic that feeds back lateral acceleration and yaw rate which have close relation to the vehicle turning performance to the steering reactive torque directly was developed. Also the evaluation test by actual vehicle using this control logic was conducted, result of which is described. The relation between the reactive torque reflected on the vehicle behavior and the driver's characteristics was analyzed.

Key Words: steer-by-wire, man-machine interface, reactive torque control, vehicle behavior

1. はじめに

これまでいろいろな方式のパワーステアリングが開発されてきたが、近年環境保全や省エネの観点から、電動モータで操舵アシスト力を電子制御する電動パワーステアリングが実用化されるようになった。さらにステアリングによって「曲がる」だけでなく、他のシャシ・駆動系機能との統合制御によって、よりインテリジェントに「曲げる」機能が操舵装置に求められており、これらを実現できる操舵装置の一つとしてステアバイワイヤ（以下SBWと称す）の開発が行われている。

SBWはステアリングギヤの動作を電子制御しており、より安全で快適な車両運動制御を自動化できる可能性を持っている。また、ステアリングホイールとステアリングギヤの間に機械的結合がないので、従来の操舵装置では避けることができなかったアクティブ操舵時の運転者と操舵装置の干渉を回避しやすい。この成果として、μスプリット路上での急制動時にはSBWを用いたアクティブ操舵による車両姿勢制御が、現行の制動・駆動力配分による方式よりも、姿勢安定化性能が高いことを確認している^{1), 2)}。

従来の操舵装置では、サスペンションジオメトリなどのステアリング以外の要素や、轍などの路面状況がステアリングホイールを操作するトルク特性や操縦性に直接影響していた。これに対しSBWでは、これらの情報を適切にコントロールし

て伝達できるため、運転者にとって最適な操作性やトルク特性を実現できる可能性がある。そこで、SBWを用いることにより、従来操舵装置とは異なるよりインテリジェントな操作性実現の可能性を求め、運転者が車両の物理的特性や路面状況などの環境特性をリニアにフィードバックして運転ができるような、より運転者側に立ったマン - マシンインタフェースとしてのステアリングシステムについての研究を行っている。

2. ステアバイワイヤシステム

本研究で用いたSBWの概要を図1に示す。運転者の操舵操作は、ステアリングホイール角センサおよびトルクセンサで測定される。コントローラは各種センサ情報を用いて、転舵アクチュエータによって前輪舵角を制御する。転舵アクチュエータには、ラックアシストタイプの電動パワーステアリングを採用した。

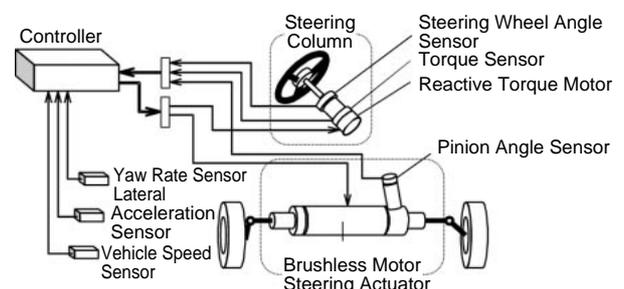


図1 システム構成
System construction

S B Wの操作性は、運転者とのインタフェースである操舵入力端の特性に大きく影響される。我々は操舵入力端の形状と、それを操作するためのトルクが重要な要素であると考え、操舵入力端形状を市場展開性と運転者感受性も考慮し、従来型のステアリングホイールタイプとした。また、運転者に手応えを与えるための機構としてモータを接続した。

3. 従来操舵感の再現

運転者は、ステアリングホイールの回転量と、それに応じて発生するトルクにより操作性を評価していると考え、操舵反力を運転者とステアリングホイールとの間の閉ループとし、運転者の入力をステアリングホイール角 δ_h のみとした。従来操舵感をできる限り再現するため、運転者への操舵反力は式(1)で示すように、コーナリングフォース係数 $K_c(V)$ 、および操舵反力比例ゲイン K_T を乗じて算出した。このときの制御ブロック図を図2に示す。

$$T_r = K_T \cdot K_c(V) \cdot \delta_h \quad (1)$$

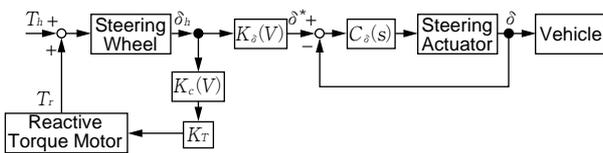


図2 反力制御ブロック図
Block diagram of reactive torque

- T_h : ドライバ入力トルク
- T_r : 反力トルク
- δ_h : ステアリングホイール角
- δ^* : 目標前輪舵角
- δ : 実前輪舵角
- $C(s)$: 前輪舵角制御器
- $K(V)$: 前輪舵角ゲイン
- $K_c(V)$: コーナリングフォース係数
- K_T : 操舵反力比例ゲイン

また、前輪舵角制御はステアリングホイール角 δ_h に車速 V の関数として設定できる理想的な前輪舵角ゲイン $K(V)$ を乗じ、目標前輪舵角 δ^* を決定し、これに実前輪舵角 δ をフィードバック制御している。

本制御ロジックを図3に示すドライビングシミュレータに搭載し、操縦性の評価を行った。路面摩擦を乾燥アスファルト路上と同等に設定し、パイロンは30m間隔で設置し、22.2m/sの車速でスラローム走行を行った。この結果を図4に示す。

パイロンの横を通過する際に操舵トルクに変動が見られる。これは、運転者が入力した操舵トルクに対応する車両挙動と、期待する車両挙動との差を補正しようとして行ったハンドル操作によるものと考えられる。



図3 ドライビングシミュレータ
Driving simulator

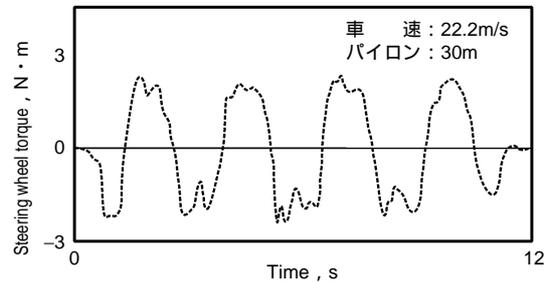


図4 ドライビングシミュレータによる試験結果
Test result of driving simulator

これは、従来車両で運転者が行っている、操舵入力系の位相遅れに対する補償操作と同様のものであり、運転者は車両の動特性に応じてフィードフォワードを行い、人間車両系全体の動特性を一定に調整している。この進み補償は運転者の精神的負担となっており^{3), 4)}、従来車両では解決が難しい問題である。この原因は、運転者が再現された操舵感の中から前輪舵角に関する疑似情報を検出し、それに基づいて車両を制御しようとすることによって発生すると考えられる。

S B Wにおける操舵反力は、通常車両の再現ではない新しい観点からの設計が可能である。もし運転者が車両挙動を直接制御できれば、フィードフォワード制御の負担が軽減されるだけでなく、操作性のさらなる向上も期待できる。そこで、ステアリングシステムを車両挙動と運転者の直接マン - マシンインタフェースとして捕らえ、操縦性を向上させる操舵反力制御について検討を行った。

4. SBWに適した操舵反力制御への取り組み

4.1 反力制御コンセプト

予備研究として実施した前項の試験では、反力制御のユーザビリティの役割として、従来型操舵感の再現だけでは不十分であることを実証した。そこでさらなる操作性、操縦性の向上を目指すため、本研究の我々のコンセプトを明確にした。

一般的な運転者特性を図5に示す。この図から運転者は、車両挙動に基づいて操縦していることが判る。そして運転者はどのような仕様の車両においても、基本的に同じ車両挙動を実現させようと操縦しているといえる。このことから車両挙動と調和の取れた操舵感の実現を第一のコンセプトとした。

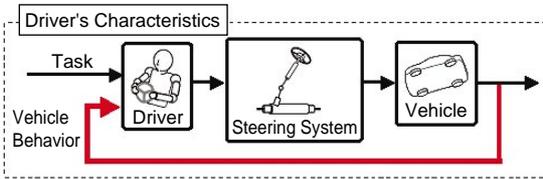


図5 運転者特性
The driver's characteristic

またSBWシステムにおいては、ステアリングギヤとハンドルホイール間に機械的結合がないため、車両の仕様に影響なく運転者に最適な操舵反力を与えることが可能となる。そこで、どのような仕様の車両にも適合可能な反力制御を確立すること(図6)を第二のコンセプトとした。

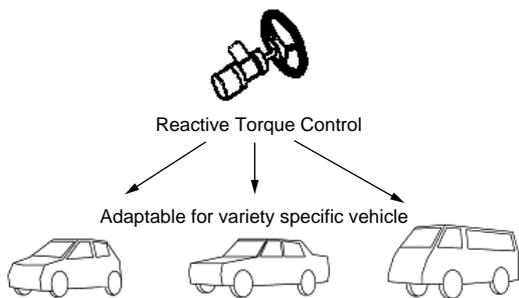


図6 SBW車両における反力トルクコンセプト
Concept of reactive torque control for SBW vehicle

これら二つのコンセプトを達成するために、様々な車両間に共通のパラメータである車両挙動を用いる事とした。また車両挙動パラメータの中から、車両の旋回運動に関連性の高いパラメータである車両の横加速度とヨーレイトを選択した。

4.2 車両挙動提示反力制御

過去に行った車両運動性能の向上を目的とした研究⁵⁾の中で、車両挙動をステアリングホイール角度として運転者に提示する制御の評価を行った。この制御では操舵反力のパラメータに前項で選択した車両の横加速度とヨーレイトを用いている。具体的には図7に示すように、ステアリングホイール角 δ_h により算出された操舵反力 T_{r1} に車両挙動フィードバック項 T_{r2} を重畳した。これによりステアリングホイール角 δ_h を車両挙動により算出された目標ステアリングホイール角 δ_h^* に追従させている。

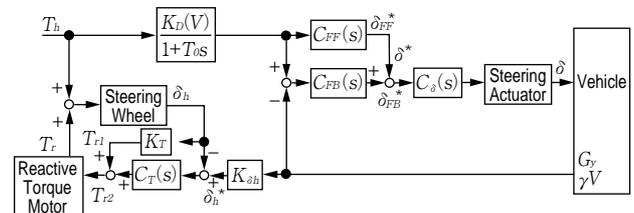


図7 車両挙動提示反力制御ブロック図

Block diagram of reactive torque reflecting vehicle behavior

この制御ロジックの効果を確認するため、ドライビングシミュレータを用いて運転者の操作にどのような影響が現れるかを調査した。試験条件は3項で行った試験と同じである。

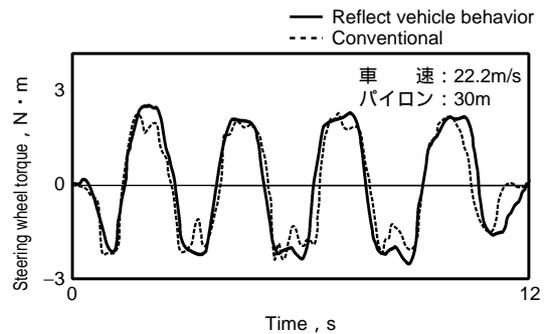


図8 ドライビングシミュレータによる制御別試験結果比較

Comparison of control logics using driving simulator

この結果、従来の操舵感を再現するような制御で見られた操舵トルクのふらつきは小さくなった。これは運転者が感じる車両挙動と、実際の車両挙動とがほぼ一致していたためである。これにより、フィードフォワードにより生じていた運転者の負担が軽減されていると考えられる。

この操舵反力制御では、運転者の操舵入力により発生するステアリングホイール角と、車両挙動より算出される目標ステアリングホイール角の間に差が生じることにより、操舵反力が発生する。

この制御により、ステアリングホイール角と、車両挙動より算出される目標ステアリングホイール角の間に偏差が出るような場合には、これを補償するように操舵反力が付与されるため、走行しやすくなるという結果が得られている。しかし運転者の入力と車両挙動とが一致する場面においては、車両挙動を反映した操舵反力は発生せず、ステアリングホイール角に比例した操舵反力のみが付加されることになり、そのため運転者が操舵反力を通じて車両挙動を感じ取ることのできない領域が通常走行時に多く存在するという問題点を残している。

4.3 車両挙動フィードバック制御

前項で述べた問題点を解決するためには、車両挙動との調和が必要な領域とそうでない領域を見極め、車両挙動を適切に返す方法を見出す必要がある。そこで車両挙動と運転者特性の関係を明確にするため、図9のブロック図に示すように、横加速度とヨーレートによる車両挙動がダイレクトに操舵反力へフィードバックされる制御を用いて、車両挙動の特性を常に操舵感として感じられるようにして、比較試験を行った。本研究においては、横加速度をパラメータに用いた制御を G_y FB制御、ヨーレートをを用いた制御を $\dot{\psi}$ FB制御と呼ぶことにする。

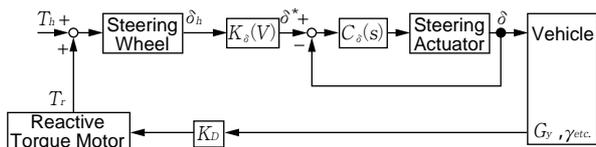


図9 車両挙動フィードバック反力制御ブロック図
Block diagram of reactive torque control with feedback of vehicle dynamics parameter

4.3.1 実走行試験

前述した制御ロジックの有効性を検証するため、レーンチェンジを想定した走行コースを設定し、実走行試験を行った。この試験に用いたコースを図10に、試験パターンを表1に示す。

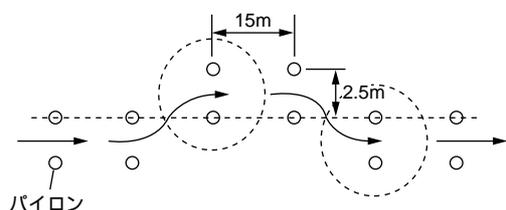


図10 試験コースレイアウト
Test course layout

表1 試験パターン

Test pattern

Parameters	Lateral Acceleration : G_y	Yaw Rate :
Vehicle Speed 8.3m/s	1	2
13.9m/s	3	4
19.4m/s	5	6

試験コースは、乾燥アスファルト路上でパイロンを中心線から左右交互になるよう15m間隔でゲート状に配置し、レーンチェンジを繰り返すように設定した。走行条件については、車速が8.3m/s、13.9m/s、19.4m/sの3水準となるよう狙い値を設定し、走行中は極力この狙い値をキープするよう被験者に指示した。但し19.4m/sの車速では急操舵を多く必要とするような限界走行に近い設定になっている。被験者については、技術者の中から無作為に3名を選出した。評価解析には図10中の丸点線で示されるパイロンゲート進入時の操縦性に注目して行った。試験結果を図11に示す。

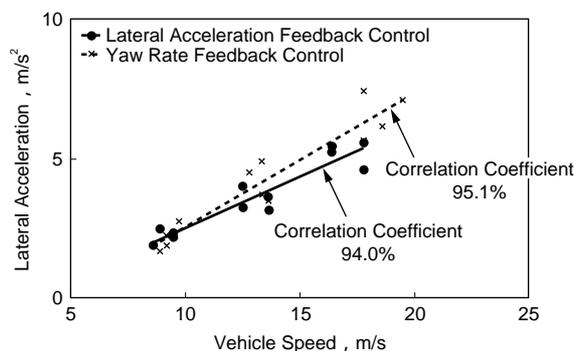


図11 車両横加速度ピーク値
Lateral acceleration peak values

前述したように車両操縦性を示す評価指標として、試験コース走行時の横加速度に着目し、各パイロンゲート進入時の横加速度のピーク値が小さいほど目標に近い形で車両を操縦出来ていると考え、車速に対する横加速度のピーク値をグラフ化した。その結果、車速と横加速度ピーク値間に、相関度がいずれも90%を超える特性が現れ、その特性が、車速19.4m/s付近で、 G_y FB制御の横加速度ピーク値が $\dot{\psi}$ FB制御のそれを下回っているという特徴が認められた。このことから G_y FB制御は、 $\dot{\psi}$ FB制御に比べ操縦性に優れていると判断できる。しかしその差異が小さいため、次に示す官能評価試験を追加実施した。

4.3.2 官能評価試験

官能評価試験は表2に示す評価項目に沿って行い、4段階評価を行った。

表2 操舵感評価試験結果
Result of sensory evaluation test

Evaluation Items		Control	Lateral Acceleration	Yaw Rate
		Feedback Control	Feedback Control	Feedback Control
Operation	Smoothness of Rotational Torque		3	3
	Resistance Feeling (inertia, viscosity, friction)		3	3
Maneuver ability	Steering Wheel Returnability		4	4
	Stability (convergence)		3	2
	Feeling of Matching with Vehicle Behavior		4	3

Ranks : 4 - Excellent ; 3 - Borderline ; 2 - Unsatisfactory ; 1 - Impossible

表2に示す結果から官能評価試験においても制御内容による評価結果に差が現れ、 G_y FB制御は、FB制御に比べて車両挙動とのつながり感に優れた評価を得られることが確認できた。

5. おわりに

本研究における一連の試験結果から、車両挙動をフィードバックした制御は、従来の操舵トルクを再現するような制御に比べ、より操縦性に優れた操舵反力を与えるということが確認できた。また、反力制御のパラメータには、ヨーレイトを使用するよりも横加速度を使用した方が、車両挙動に調和したフィーリングを与えられるということが判った。

今後は、操舵感を最適にするための車両挙動パラメータ特性として、位相およびゲインの観点から詳細に解析し、操舵反力の動的特性を具体化していく。また直進走行から操舵開始時の操舵トルク特性などの静的特性についても、運転者に最適な特性を明らかにし、最終的にはマン - マシンインタフェースとして最適なステアリングの操舵を確立していく。

参考文献

- 1) Segawa, M., Nishizaki, K. and Nakano, S.: A STUDY OF VEHICLE STABILITY CONTROL BY STEER BY WIRE SYSTEM. Proc. Int. Conf. On AVEC (2000).
- 2) Nishizaki, K., Hayama, R., Nakano, S. and Kato, K.: Active Stability Control Strategy for Steer By Wire System during Sudden Braking. CD-ROM of the 7th congress on ITS, Turin (2000).
- 3) McDonnell, J. D.: Pilot Rating Techniques for the Estimation and Evaluation of Handling Qualities, AFFDL-TR-68-76 (1968).

- 4) Horiuchi, S.: A Brief Review of Human Operator Models and Their Application to Handling Qualities Evaluation. Journal of JSAE (in Japanese with English summary). vol. 45, no. 3 (1991) 5.
- 5) Nakano, S., Nishizaki, K., Nishihara, O., and Kumamoto, H.: Steering Control Strategies for the Steer-by-Wire System (Second Report). Trans. of JSAE (in Japanese with English summary). vol. 33, no. 3 (2002), 121.

筆者



木村秀司*
S. KIMURA



瀬川雅也*
M. SEGAWA



嘉田友保*
T. KADA



中野史郎**
S. NAKANO

* 総合技術研究所 電子システム研究部

** 総合技術研究所 電子システム研究部 工学博士