

論文の内容の要旨

論文題目 The Control of Steering Angle and Steering Torque for Steer-By-Wire System and its Feeling Evaluation (ステアバイワイヤの舵角・反力制御およびそのフィーリング評価に関する研究)

氏名 リムピバンテン ティーラワット

近年、燃費や環境などの観点から、油圧システムで操舵力をアシストする従来のパワーステアリングの代わりに、電動モータで操舵力をアシストする電動パワーステアリング (EPS) が数多く開発されてきた。現在では、本来のステアリングシステムの機能だけではなく、さらに車両の操縦性能を高める様々な車両統合制御システムの一部としての機能が要求されており、これらの機能を実現するために、EPS から、ステアバイワイヤシステム (SBW) が開発されている。車両運動性能と制御の観点から、SBW 系の最大の利点としては、SBW 系では、ハンドルと前輪の間に機械的なリンクを使わずに、電氣的に制御することである。これによって、SBW 系は、従来の操舵系に比べ制御の自由度が多くなり、舵角と反力を独立で自由に制御することができるので、車両の操縦性能とフィーリングを同時に向上することが可能である。しかし、制御の自由度が多いため、SBW 系を設計しにくい反面もある。舵角と反力の自由度を、同時に利用するための方法に関する研究がほとんどない。すなわち、従来の提案されたシステムが、SBW 系の潜在能力を十分に利用するものとは言いがたい。現在の SBW 系に関する研究では、

- ・車はマンーマシンシステムなので、閉ループに基づいて設計した方が良いが、現在の SBW 系は、開ループに基づいて設計し、設計プロセスの効率が悪い。なぜならば、安定性が高い車が運転しやすいという保障はないからである。

- ・SBW 系では、舵角と反力を自由に決められるという利点があるのに、今まで提案された SBW 系は、ほとんど反力を考慮せずに、舵角制御システムとして設計されてきた。ただし、フィーリングが重要な要素である操舵系の設計では、反力を無視することはできない。

- ・SBW 系のフィーリングに関する研究はほとんどない。また、設計段階からフィーリングも考慮に入れている研究もないと言える。

などの問題点を挙げるができる。そこで、これらの問題に応じて、本論文では、閉ループの設計に基づき、舵角コントローラ、反力コントローラ、そしてフィーリングを考慮に入れる新たな設計方法により、車両の操縦性能とフィーリングを同時に向上する SBW 系を目指している。この目的を達成するために、本論文は、

1. まず、舵角と反力を同時に制御する SBW 系を評価するためのドライバモデルを提案した。
2. 次に、舵角と反力を自由に制御できる操舵系のフィーリング評価方法を提案した。
3. 最後に、提案したドライバモデルとフィーリング評価方法を利用して、舵角制御だけではなく、反力制御も入れる SBW 系の制御方式を提案した。

また、本研究では、対象となる SBW 系として、ハンドル角度と前輪のセルフアライニングトルクだけを使用した前輪舵角と反力を制御する四端子回路の SBW 系 (図 1 参照) を採用した。

上記第 1 項目では、SBW 系を評価するためのドライバモデルについて論じた。従来のドライバ

モデルは舵角を制御するモデルが多く、反力に関しては扱われていなかった。そのため、従来のドライバモデルでは、舵角と反力を同時に制御する SBW 系の設計と評価が不可能であった。本研究では、反力も扱えるように、図 2 のように述べられるバイラテラルドライバモデルを提案し、これの特性を体系的かつ詳細に調べた。また、提案したドライバモデルにおいては、ドライバのハンドル角度と入力トルクが同時に決められるため、人間-自動車系を従来のブロック線図で表すことが困難になる。従って、本論文では、一次連立方程式システムを応用した人間-自動車系のシミュレーション方法も提案した。シミュレーションとドライビングシミュレータによる実験により、提案したドライバモデルは、舵角制御にも反力制御にも対応でき、様々な操舵特性におけるドライバ挙動を表せることを確認した。また、提案したドライバモデルに基づいて、車線変更の時には、ドライバの操作が遅い操作であると見なすことができ、ドライバの腕がばねとして簡略化することができる。図 3 は車線変更のシミュレーションと実験結果の一例である。ただし、外乱を受けた時には、ドライバ操作が横変位の補償操作だけではなく、反力の反射操作と反力の補償操作でも構成される。図 4 は横風を受けた時のシミュレーションと実験結果の一例である。車両の安定性に関しては、車線変更の安定性は、舵角ゲインを減らすことで、または反力ゲインを増やすことで向上できる。そして、反力ゲインが高いほど、外乱の影響を早く補償することができる。これらの反力ゲインの効果は、従来のドライバモデルでは証明できなかった。上記のように、提案したドライバモデルを利用することにより、従来のドライバモデルではできない、舵角と反力を同時に制御する SBW 系の設計と評価が可能になった。

上記第 2 項目では、操舵系のフィーリング評価方法について論じた。本論文では、従来の様々なフィーリング評価方法をまとめ、反力の自由度が加わった SBW 系のフィーリング評価方法を提案し、ドライビングシミュレータによる実験により、この方法の妥当性を確認した。実験により、普通の運転のフィーリングは、車両応答の特性と関係なく、反力応答の特性だけに影響されることを証明でき、その結果、車両の反力を単純ばね-ダンパー系として簡略する評価方法を提案した。本研究では、等価ばね定数を反力の定常ゲインに合わせるように計算し、等価減衰係数を 0.2Hz での反力の位相に合わせるように計算することにした。この方法により、従来のように実車の走行実験を行わなくても、操舵系の重要なフィーリング特性（手応え感、応答感、戻り感）を、等価ばね定数と等価減衰係数の値で事前に理論的に評価できるようになった。従来のフィーリング評価と解析により、手応え感は等価減衰係数と相関関係があり、応答感は等価ばね定数と相関関係があり、戻り感は等価減衰係数とばね定数との比率と相関関係があることがわかった。SBW 系のフィーリングを設計するにあたり、速度によって変化する等価ばね定数と等価減衰係数の適切な範囲は、図 5 で示すことができる。この図から、等価減衰係数は、60 キロの時に 1Nms/rad 程度に設定し、150 キロになるとその 2 倍程度に増加させれば良く、等価ばね定数は、60 キロの時に 5Nm/rad 程度に設定し、150 キロになるとその 2 倍程度に増加させれば良いことがわかる。一方、等価減衰係数とばね定数との比率は、速度と関係なく、0.15 から 0.2 ぐらいに設定すれば良いことがわかる。なお、提案した評価方法に基づき、図 1 のような SBW 系のフィーリングは、ハンドル角度と反力との傾き（図 6 参照）でさらに簡単に評価と設定ができる。この傾きは、舵角ゲインと反力ゲインの積 ($\text{Alpha11} \times \text{Alpha22}$) で決められる。上記のように、提案したフィーリング評価方法により、SBW 系の設計段階からフィーリングも考慮に入れることが可能になった。

上記第 3 項目では、SBW 系の制御方式について論じた。提案したドライバモデルとフィーリン

グ評価方法を利用して、従来から多く研究されている舵角の制御だけではなく、反力の制御も考慮したシミュレーションにより、制御ロジックを整理し、ドライビングシミュレータによる実験で制御の効果を確認した。本論文では、車線変更の安定性とそのフィーリングを同時に向上するように SBW 系を設計した。提案したドライバモデルを用いたシミュレーションにより、車線変更の安定性は、定常舵角ゲインを低くすること、またはシステムの遅れ補償によって高くなることがわかった。定常舵角ゲインの設計については、車線変更の安定性と Task Performance を同時に向上させるために、最適制御を応用して最適定常舵角ゲインを計算した。図 7 により、提案したドライバモデルにおける最適定常舵角ゲインは、ドライバ操作が反力に影響されるため、反力を考慮しない従来のドライバモデルより速度による変化が少ない。最適定常舵角ゲインは、低速の時には一定横加速度ゲインの車に近く、高速になると定常滑り角のゼロである 4WS の車に近いことがわかる。次に、システムの遅れ補償には、車両遅れ補償とドライバ遅れ補償がある。車両遅れは、微分ハンドルで補償できる(図 8 参照)。微分ハンドルのゲインは、速度に比例して、60 km/h ごとに 0.1 s ずつ増やせば良いことがわかった。一方、ドライバ遅れを補償するには、微分ハンドルだけでは不十分で、ドライバトルクの微分フィードバックも必要である(図 9 参照)。このトルクフィードバックの必要性は、従来のドライバモデルで説明できなかった。フィーリングも考慮した上で、ドライバ遅れの補償ゲインは、0.1 秒程度に設定すれば良いことがわかった。なお、提案したフィーリング評価方法に基づいて、車両遅れ補償とドライバ遅れ補償は、反力のダンピングを改良する効果があり、フィーリングも向上できることがわかった(図 10 参照)。また、ドライビングシミュレータによる実験により、上記の SBW 制御の効果を確認した(図 11 参照)。そして、その結果により、最適定常舵角ゲインのみの SBW 系より、遅れも補償する SBW 系の方が広い範囲で効果があることがわかった。

$$\begin{bmatrix} \delta_f \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 \\ 0 & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_h \\ SAT \end{bmatrix}$$

when δ_h : Steering Wheel Angle
 δ_f : Front-Wheel Steering Angle
 SAT : Self-Aligning Torque
 T : Steering Torque

Fig. 1 SBW Model

$$\frac{\delta_h}{K_\delta} + \frac{T_d}{K_T} = \Delta Y_{future} e^{-\lambda_d t}$$

when δ_h : Steering Wheel Angle
 T_d : Driver Torque

Fig. 2 Bilateral Driver Model

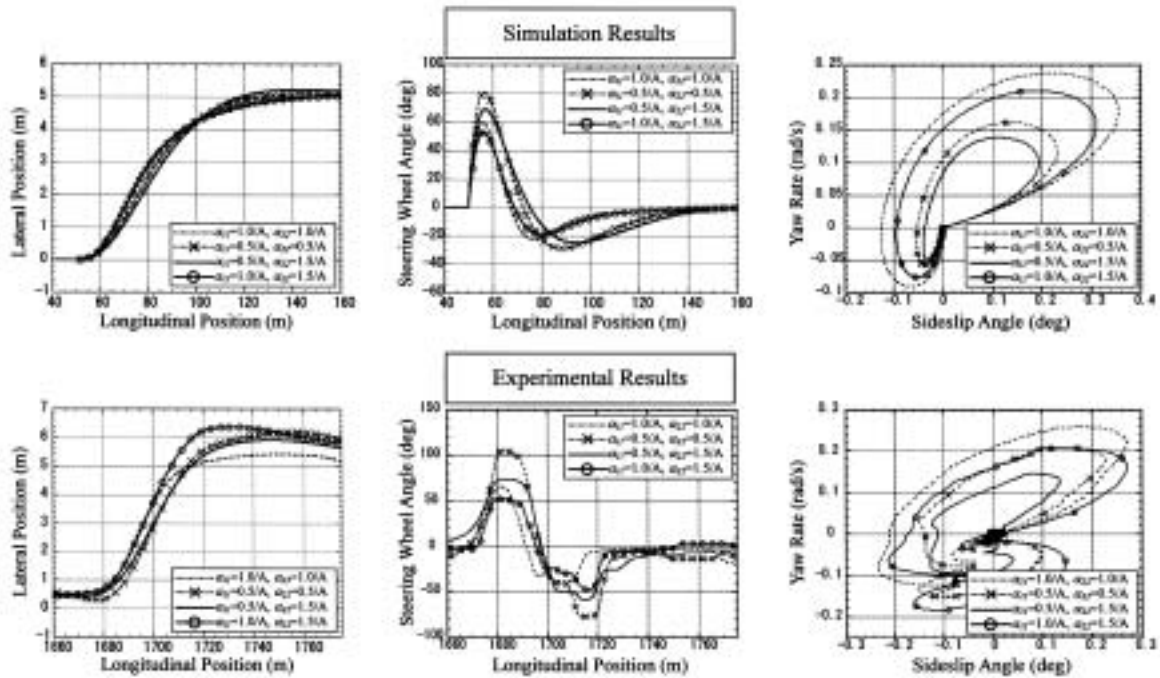


Fig. 3 Simulation and Experimental Results of Lane Changing at 60 km/h

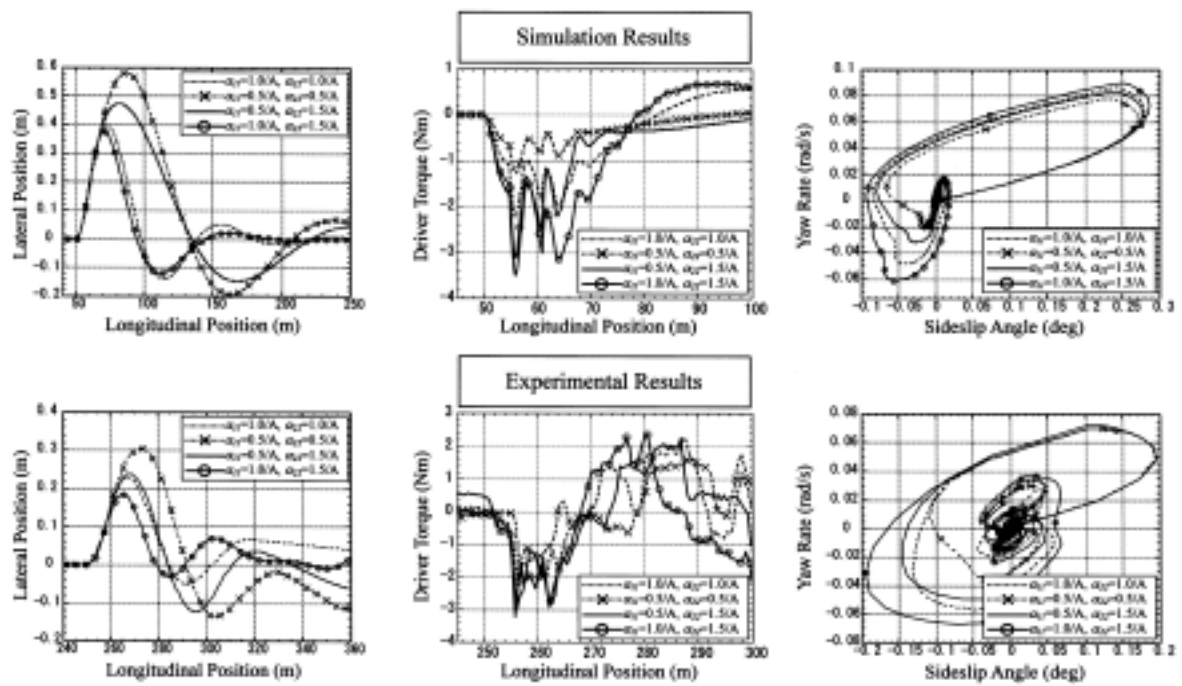


Fig. 4 Simulation and Experimental Results under Crosswind at 60 km/h

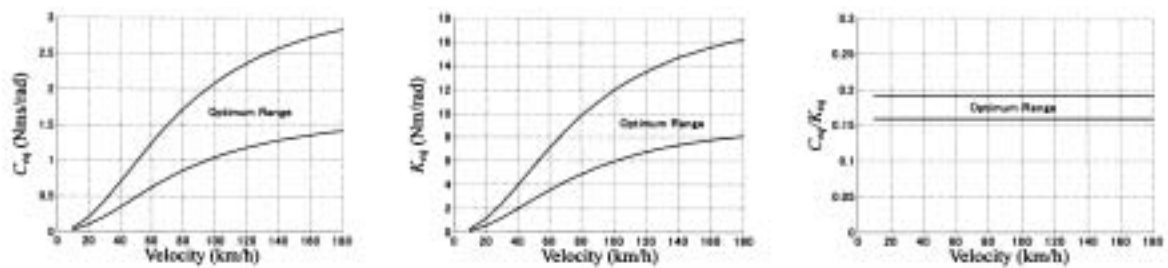


Fig. 5 Optimal Range of C_{ey} and K_{ey}

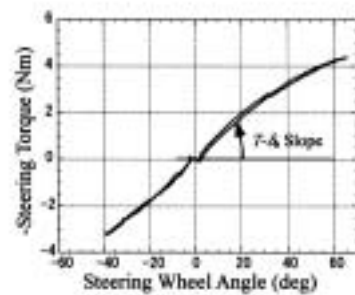


Fig. 6 $T-\delta$ Diagram

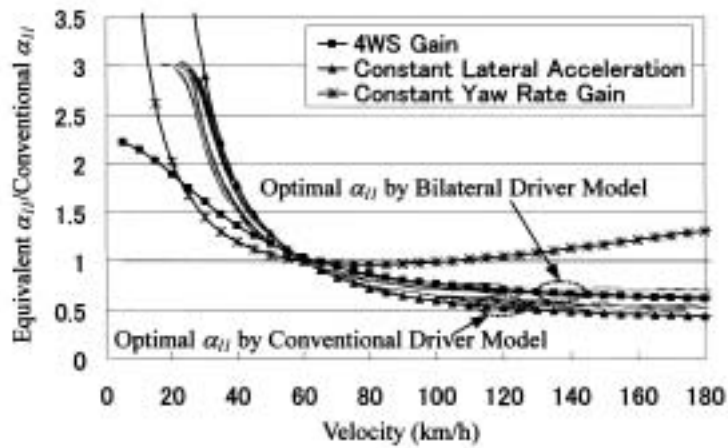


Fig. 7 Comparison of Steering Angle Gain

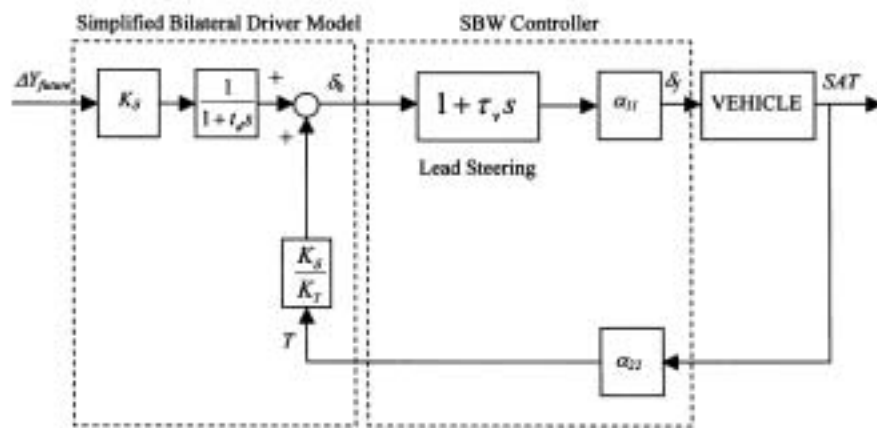


Fig. 8 Vehicle Delay Compensation

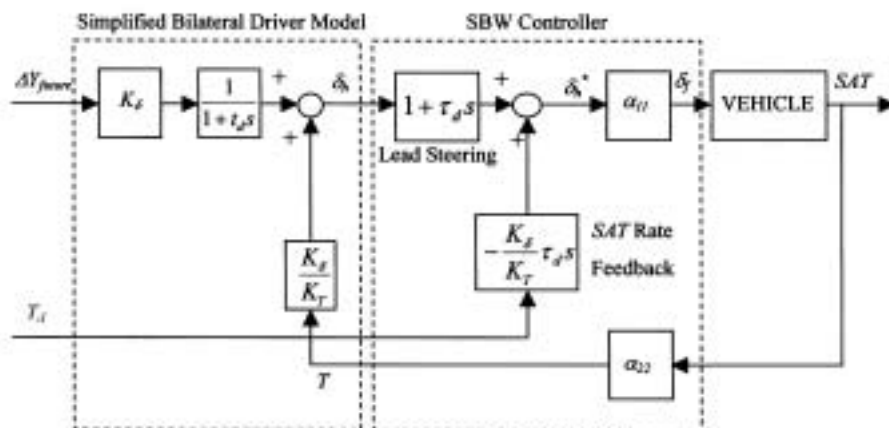


Fig. 9 Driver Delay Compensation

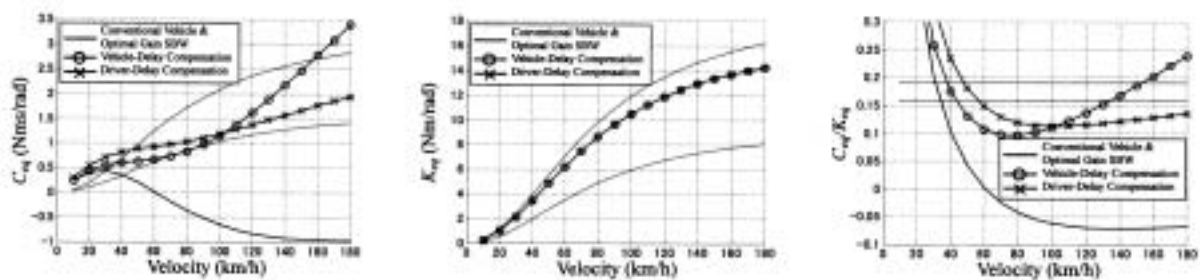


Fig. 10 C_{eq} and K_{eq} of Designed SBW Systems

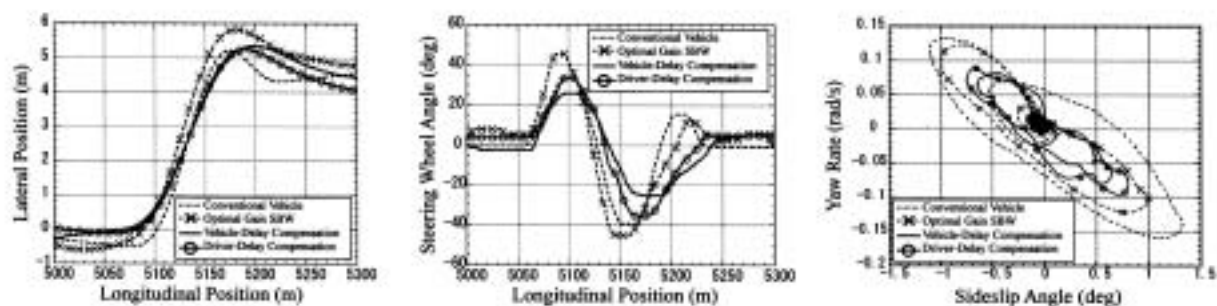


Fig. 11 Experimental Results of Lane Changing at 150 km/h