

人間の操舵特性・認知特性を考慮した次世代 SBW 制御系の構築

Design of Steer by Wire System considering Human's Steering and Detection Characteristics

1091021



研究代表者

熊本大学 大学院 自然科学研究科 教授

松 永 信 智

[研究の目的]

次世代の自動車では、高齢者、身体障害者などの個々のドライバの状況に応じて最適な性能を得ることが期待されている。そのためには人間がシステムに物理的に介入することを考慮した制御システムの構築が必要である。

現在の自動車の操舵系は、ドライバのハンドル操作量をアシストする電気式パワーアシストシステムであり、操舵量が試行錯誤で決められる。近年、自動車の高度化に伴い操舵の機械的結合をエレクトロニクスに置き換えたステアバイワイヤ (SBW) が注目されている。

SBW は人と路面の特性を双方向に与えることが可能で、人間にとって運転しやすいスキームを容易に構成することが期待される。今後、安全な特性の実現はもちろんのこと、人の操舵特性・認知特性を考慮した SBW の調整手法がさらに重要になると思われる。

本研究では、小型電気自動車を対象に人間の動的な認知特性を実現する動的なスケーリング手法を明らかにする。まず、系の受動性に基づくロバストな SBW システムの構成手法を示す。次に、SBW システムはハンドル角の操舵特性や反力の特性を任意に調整もできることから、機械が任意の特性にゲインを調整する際の適応事例として、走行中の反力調整の実験を行った。さらに、実験を通して操舵パラメータが人間の操作に与える影響の解明に取り組んだ。

[研究の内容・成果]

1. SBW 制御系の設計

SBW システムでは、ハンドルに対して前輪が追従するだけでなく、前輪に加わる反力を操舵者に操舵反力として伝えることが重要となる。そこで、ハンドル側・前輪側双方向の情報を伝達する力帰還型バイラテラル制御系を構成する。まずトルクと角度の理想応答を次式で与える。

$$\begin{cases} \tau_h(t) = \gamma \tau_e(t) \\ \delta_s(t) = \sigma \delta_h(t) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

なお、は環境から発生したトルク $\tau_e(t)$ からハンドルトルク $\tau_h(t)$ への伝達特性、 σ はハンドル操舵角 $\delta_h(t)$ からピニオン軸角度 $\delta_s(t)$ までの伝達特性を示す。

このとき、式 (1) の理想特性を満たす力帰還型のバイラテラル制御系のブロック図を図 1 に示す。なお、一般にユニバーサルジョイントを経由して前輪が操舵される現在の機械結合の車両の場合、 $\sigma = \gamma = 1$ である。

操舵者がハンドルを操舵するとき、タイヤからの外乱は環境との物理的な干渉によって発生する。環境のインピーダンスを $Z_e(s)$ とすると操舵インピーダンス $G_e(s)$ は、カスケードゲイン γ と位置スケーリングゲイン σ の積として認識することになる。

$$\frac{\mathcal{L}(\delta_h(t))}{\mathcal{L}(\tau_h(t))} = G_e(s) = \frac{1}{\gamma \sigma Z_e(s)} \dots\dots\dots (2)$$

なお、 $\mathcal{L}$ はラプラスオペレータである。

このように、SBW は同じインピーダンスを実現する場合でも、操舵角・操作量を任意に決定できる点に特徴がある。

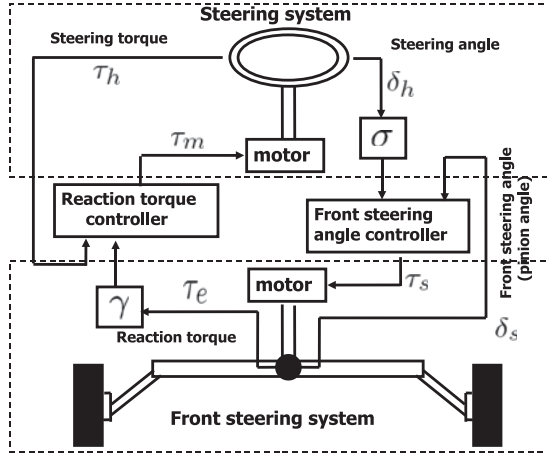


図1 力帰還型のバイラテラル制御系

2. パッシブコントローラの設計

操舵において、ハンドルの急な操舵や遅れのある反力をフィードバックすると、操作性の劣化から事故につながる恐れがある。SBW システムは人間-機械系システムの典型例であり、人間が介入することから安定性の確保が重要である。人間-機械システムの安定性を保証する手法として様々な方法があるが、本報告では系の受動性に基づくコントローラ設計を行う。

操舵トルク $\delta_h(t)$ および速度ベクトル $\nu_h(t)$ の任意の時間の積分値が正となれば、系のエネルギーが消散され受動的となる。そこで、

$$E_{obs}(t) = \Delta T \sum_{k=0}^t \tau_h(t) \nu_h(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

を計測する。この観測量に従ってパッシブコントローラ（PC）のゲインを

$$\alpha(t) = \begin{cases} -\frac{E_{obs}(t)}{\Delta T \nu_h(t)^2} & \text{if } E_{obs}(t) \leq 0 \\ 0 & \text{if } E_{obs}(t) > 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と設定し、

$$\tau_h'(t) = \tau_h(t) + \alpha(t) \nu_h(t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となるように反力 $\tau_h'(t)$ を生成できれば系は

安定となる。ここで $\nu_h(t)$ はハンドルの操舵速度である。本式は、路面の変化で急激な操舵を誘発する場合に、電子的な粘性負荷を追加して不安定な動作を防止するような制御を行う。

3. SBW の実験検証

図2に実験に使用する小型電気自動車を示す。

図3に $\sigma = \gamma = 1$ として据え切り実験を行った

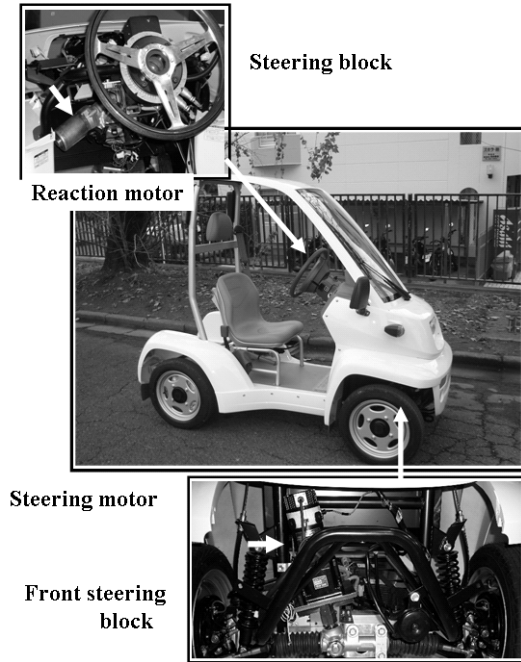


図2 SBW 実験車両（COMS）

場合のSBW 制御系の応答特性を示す。図において、実線が従来の機械リンクの場合、点線がSBW の特性である。詳細な応答波形は省略するが、良好な反力特性が得られている。

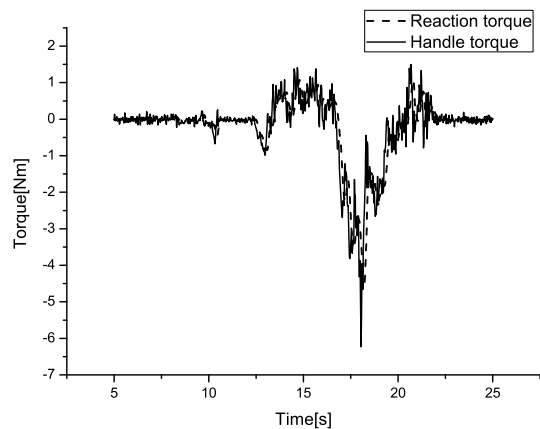
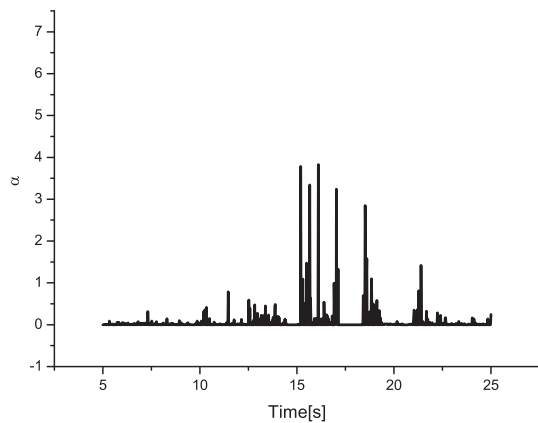


図3 走行時のハンドルトルク

図4 PCの係数 α

実際に走行した場合は路面状態により反力が変化するが、図3にその時のハンドルトルクを示す。なお、同図は時速15[km/h]でのアスファルト路面を走行中に15~20[s]で左に90[deg]旋回している。

走行状態の変化に伴い受動性も変化し、それに従いコントローラが動作する。図4に設計したPCの係数を示すが、運転状況により変動していることがわかる。なお、走行中の車両の受動性は十分条件であり、ゲイン調整は保守的になる場合が多い。

4. 状態に応じた双方向ゲインの調整

SBW制御系の特性は操舵特性 σ と反力特性 γ を調整できる点に特徴があり、これらのパラメータを路面や走行状態や運転者の特性に合わせて修正することにより、様々な操舵感を実現できる。

本章では、最も簡単な例として操舵特性 $\sigma=1$ を固定し、反力特性 γ を任意調整できるコントローラを示す。前章で構築したSBW系を改めて制御ループで図示すると、図5のようにPCにより反力ゲイン γ を微分補償している構造となる。

ここで、走行条件に応じて反力ゲイン γ を任意に変更することを考える。たとえば平地での動作は直進しやすい反力の大きな特性、山岳地は急カーブが多く反力の小さな特性が適するなど、路面状態により運転特性を再配置する効果

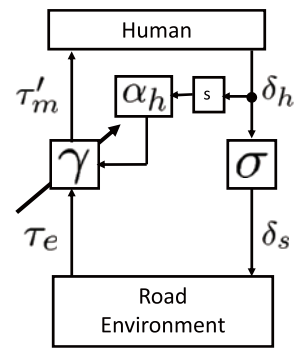


図5 反力特性による能動的な修正法

が大きい。

前章で設計したSBWの操舵特性に影響を与えないように、走行中に反力特性 γ の調整ができれば望ましい。そこで、任意に反力特性 γ を変えた場合の基礎実験として、ディスプレイに表示されるターゲットを車のステアリングで追従し、そのときの人の自己調整速度を計測した。図6に模擬実験システムの外観を示す。

実験の結果、追従におけるむだ時間は0.5秒前後であり、人間の操舵インピーダンスの調整に少なくとも数秒以上（最短で5秒前後）が必要となる。また、反力特性の変更が早いと操作の違和感があることがわかった。このように、人間の操舵インピーダンスの調整時間は明らかになったが、走行中の反力特性の調整機構の実装においては、最適な γ の変更タイミング、 γ の変更幅の決定や安全のために操作不感帯の設定など更なる検討が必要となる。



図6 人の操舵特性計測装置外観

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では, SBW による操舵システムが, 人間と環境の干渉特性を双方向に調整できる点に注目し, その関係を積極的に利用する SBW 制御系の設計, SBW による力フィードバック特性の動的調整方法, そのパラメータが人間の操作に与える影響の解明に取り組んだ。

SBW 制御系の設計に関しては, 人間の定性的な特性が明らかになったところであり, 今後は人の操舵モデルのパラメータ同定やそのモデルに応じた設計法が今後の課題である。

[研究の発表, 論文等]

- [1] 吉田達郎, 任 宰成, 中田泰志, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: 非線形スケーリングゲインを用いた Steer-by-Wire 制御系の操舵特性の評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '09 講演論文集, 1P1-D06 (1-2), 2009
- [2] 与那覇翔平, 岡島寛, 松永信智, 川路茂保: 直接ヨーモーメント制御による後輪独立駆動車両の操舵実験, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '09 講演論文集, 2P1-E17 (1-2), 2009
- [3] 堀口充輝, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: タイヤ発生力限界を考慮した 4 輪独立駆動車両の最適駆動力配分, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '09 講演論文集, 2P1-E13 (1-2), 2009
- [4] 堀口充輝, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: 4 輪独立駆動車の制駆動力配分と前輪操舵の協調制御,

第 28 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 福岡, pp.61-62, 2009

- [5] Nobutomo Matsunaga, Im Jaesung and Shigeyasu Kawaji: Control of Steer-by-Wire Vehicles using Bilateral Control Designed by Passivity Approach, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 4, No. 1, pp. 50-60, 2010
- [6] 松永信智, 与那覇翔平, 岡島 寛, 川路茂保: 直接ヨーモーメント法による後輪独立駆動車両の制御, 電気学会産業計測制御研究会資料 IIC-10-178, pp. 29-34, 2010
- [7] 吉田達郎, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: 路面反力の伝達特性を考慮した Steer-by-Wire システムの設計, 平成 22 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 熊本, pp. 1179-1184, 2010
- [8] 与那覇翔平, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: DYC による所望のステアリング特性の実現, 平成 22 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 熊本, pp. 1191-1196, 2010
- [9] Hiroshi Okajima, Shohei Yonaha, Nobutomo, Matsunaga and Shigeyasu Kawaji: Direct Yaw-Moment Control Method for Electric Vehicles to Follow the Desired Path by Driver, SICE Annual Conference 2010 in Taiwan, pp. 642-647, 2010
- [10] 吉田達郎, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: 路面反力係数の調整に伴う Steer-by-Wire 車両の操舵特性の評価, 第 29 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 宮崎, pp. 61-64, 2010
- [11] 与那覇翔平, 岡島 寛, 松永信智, 川路茂保: DYC を用いた後輪独立駆動車両の制御実験, 第 29 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 宮崎, pp. 53-56, 2010