

運転状態図を用いた操舵反力制御とその効果について

Effects of Steering Torque Control Using Driving Diagram

山 脇 茂* 清 水 康 夫*
Shigeru YAMAWAKI Yasuo SHIMIZU

要 旨

運転状態図を提案し、この図に基づいて考案した新しい操舵反力制御方法とその効果について述べる。運転状態図は、前輪の実舵角 δ と前後輪の滑り角差 β_{fr} を用いて、運転者の操作による車両挙動の状態を表現したものであり、新しい操舵反力制御は、運転者に対して車両が最も安定な状態になる前輪の実舵角に導くような操舵反力を付与する。これにより車両がスピン状態に陥ったとき、どちらの方向に操舵すれば車両を安定化させられるのか知ることができる。この運転状態図の有効性を述べるとともに、操舵反力制御をEPS(Electric Power Steering; 電動パワーステアリング)を搭載した車両に用いて実走行テストを行った結果、車両のアンダステアとオーバステア時に、その効果が確認できた。

ABSTRACT

This paper proposes a driving diagram, sets out a new steering torque control method derived from the diagram, and explains the effectiveness of this method. The driving diagram uses the actual steering angle δ of the front road wheels and difference between front tire slip angle and rear tire slip angle β_{fr} to express the vehicle behavior resulting from driver operation. The new steering torque control applies steering reaction torque to the driver in order to elicit the front road wheel actual steering angle that will bring about the most stable state of the vehicle. In this way, when the vehicle enters a spinning state, the driver can know the direction in which to steer in order to stabilize the vehicle.

Along with a discussion of the effectiveness of this driving diagram, the paper also provides the results of driving tests conducted using a vehicle equipped with Electric Power Steering (EPS) with steering torque control. These tests confirmed the effectiveness of this method for the vehicle in both under-steer and over-steer states.

1. はじめに

人間—自動車系において、操舵反力は重要な役割を担っている。例えば、車両のオーバステア時にセルフアライニングトルクを大きくすると、スピンを立て直す時のハンドル戻し遅れを小さくすることができる。また近年に至っては操舵反力を車両のヨーレートや横加速度等に応じて制御することにより、車両のヨー応答の向上や、外乱に対して車両の乱れを抑制する報告もなされている^{(1)~(3)}。一方、車両のアンダステアやオーバステアの状態を前後輪の滑り角差($\beta_f - \beta_r$)などを用いて記述できることも知られているが⁽⁴⁾、アンダステアやオーバステアなどの運転状況に応じて操舵反力を付与し、ドリフトアウトやスピンなど運転者の不測の事態を回避する有効な提案は見られない。

車両の前輪の実舵角と前後輪の滑り角差を用いて、アン

ダステアやオーバステアの状態を把握する手法である運転状態図と、その状態図に基づいて考案した操舵反力特性を提案し⁽⁵⁾、この特性よりアンダステア時のドリフトアウトや、オーバステア時に発生したスピンのリカバリを行う操舵反力制御手法を導出し、この制御手法を用いた電動パワーステアリング装置(EPS)を搭載した車両を用いて低摩擦係数路においてテストした結果、性能の向上を確認したので報告する。

2. 運転状態図($\delta - \beta_{fr}$ 線図)

2.1. 運転状態図

Fig. 1 の様に、前輪の実舵角 δ と前後輪滑り角差 $\beta_{fr}(=\beta_f - \beta_r)$ を用いて、運転者の操舵している舵角と車両の滑り状態により車両のステア特性の状態を表現し、これを運

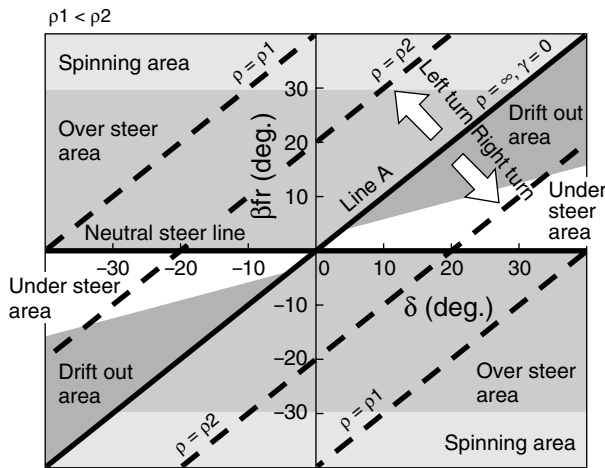


Fig. 1 Driving diagram

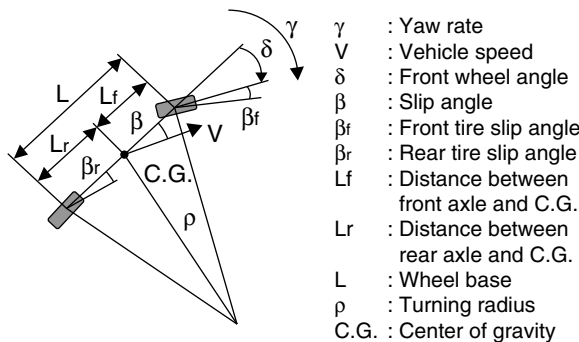


Fig. 2 Vehicle model and nomenclature

転状態図と呼ぶ。この状態図を、Fig. 2の二輪モデルを使って説明する。タイヤの滑り角 β_f , β_r は、次式で表現できる。なお滑り角は運転状態図での右旋回を第一象限、左旋回を第三象限となるよう考慮し、通常と逆方向を正とする。

$$\beta_f = -\beta - L_f \cdot \gamma / V + \delta \quad (1)$$

$$\beta_r = -\beta + L_r \cdot \gamma / V \quad (2)$$

ここで、車両のステア特性の状態を表現するために式(1), (2)より β を消去し β_{fr} を求めると

$$\beta_{fr} = \beta_f - \beta_r = -L \cdot \gamma / V + \delta \quad (3)$$

また、ここでは β が γ に比較し小さい領域とし無視し、旋回半径を $\rho = V / \gamma$ とすると

$$\beta_{fr} = -L / \rho + \delta \quad (4)$$

$$\rho = L / (\delta - \beta_{fr}) \quad (4)$$

式(4)は、例えば定常円旋回中に $\delta > 0$ の時、 $\delta > \beta_{fr}$ であれば ρ が大きくなり(アンダステア領域)、 $\beta_{fr} < 0$ であれば ρ が小さくなること(オーバステア領域)を示す。また、 $\delta < 0$ の時でも、 $\beta_{fr} < 0$ かつ $\delta - \beta_{fr} > 0$ であれ

ば ρ がさらに小さくなることから、この領域もオーバステア領域である。

Fig. 1のラインAは車両が直進状態($\gamma = 0$)の時の δ と β_{fr} の関係を示す。これは、式(3)より $\gamma = 0$ の時は、 $\beta_{fr} = \delta$ を示すことによる。また、ラインAは、式(4)より ρ をパラメータとして、破線で示すように β_{fr} 軸上を推移する。このことから δ と β_{fr} から ρ を求めることができる。

2.2. 実走行による運転軌跡

次に、運転状態図上で運転者の操作を示す δ と車両の滑り状態を示す β_{fr} が、どのように表現できるかその軌跡について検討した。実際に車両を走行させた時の運転状態図をFig. 3～6に示す。車両はFF車を用いた。

2.2.1. アンダステア領域(レーンチェンジ)

車速が一定の時には、ヨーレートゲイン $G_\gamma (= \gamma / \delta)$ をほぼ一定とすると、式(3)より

$$\beta_{fr} = \delta (1 - L \cdot G_\gamma / V) \quad (5)$$

この式(5)から、 β_{fr} は傾き $(1 - L \cdot G_\gamma / V)$ で δ に比例する。しかし、実際には δ の切り始めに位相遅れが発生するのでFig. 3の様に、運転軌跡はヒステリシスを有する。

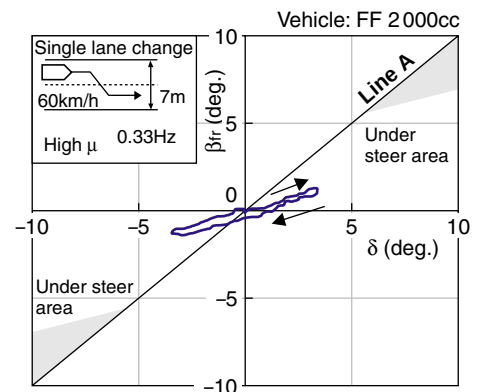


Fig. 3 Single lane change (Under steer)

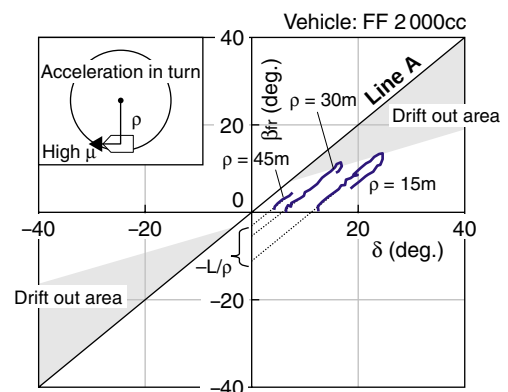


Fig. 4 Acceleration in turn (Under steer)

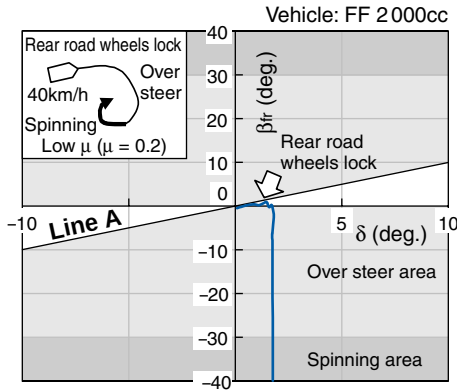


Fig. 5 Spinning (Over steer)

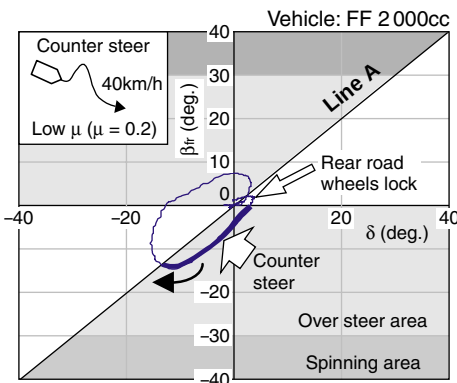


Fig. 6 Spinning recovery (Over steer)

2.2.2. ドリフトアウト領域(加速円旋回)

Fig. 4 の様に、旋回する円をトレースできるようあらかじめ停止の状態から右回転に一定の δ を切り、加速を始め δ を切り増しながら円旋回をすると、 ρ は一定なので式(4)より、 β_{fr} 軸上にて $(-L/\rho)$ で交差するラインAに平行な直線上を移動する。更に δ を切りこむか車速 V を大きくすると、 β_{fr} が増大しドリフトアウト領域に達する。車両の β_{fr} には限界があり、 δ との関係により δ を切り増しても旋回半径が減少しない領域であるドリフトアウト領域が存在する。Fig. 4 のドリフトアウト領域は実験的に求めた。

2.2.3. オーバステア領域(スピン)

Fig. 5 に示すように、 δ を固定して旋回開始時に後輪を強制的にブレーキでロックさせることにより、車両がスピンし $|\beta_{fr}|$ が急激に大きくなる。これは同じ δ でも式(4)より、 ρ が小さくなるからである。車両の $|\beta_{fr}|$ にも限界があり、 δ を戻しても旋回半径を大きくできなくなるスピン領域が存在する。Fig. 5 のスピン領域は実験的に求めた。

Fig. 6 は、スピリカバリ時のカウンタ操作を示す。オーバステアになった後、 δ を逆方向に切って、 $|\beta_{fr}|$ の増加を抑え、かつ γ をゼロにする(ラインA方向に近づける)操作を行ってスピンを回避していることがわかる。

3. 新しい操舵反力制御の検討

3.1. 操舵反力特性

Fig. 4 より、アンダステア時の操舵反力制御は、ドリフトアウト領域に入らないようにするために、ドリフトアウト領域に近づく β_{fr} を大きくしないように、 δ を切り増しづらい大きな操舵反力制御トルクを付与すること、Fig. 5, 6 より、オーバステア時にはカウンタ操作をアシストするように β_{fr} , γ をゼロに戻す操舵方向に操舵反力制御トルクを付与することが望ましいと考えた。したがって、式(3)より

$$\delta = \beta_{fr} + L \cdot \gamma / V \quad (3)$$

β_{fr} と γ をゼロ方向に減少させるために、式(3)より操舵反力特性としての反力制御トルク $Tr1$ を以下のように定めた。

$$Tr1 = G1 \cdot \beta_{fr} + G2 \cdot \gamma \quad (6)$$

($G1$, $G2$ は係数)

3.2. 車両を安定化させる制御手法

Fig. 1 と式(6)より、具体的な制御アルゴリズムについて検討する。車両のアンダ、オーバステア状態の判断は、 β_{fr} の符号と、 β_{fr} を求めるときに使用する γ の符号により下式のように決定できる。アンダステア状態は式(7)、オーバステア状態は式(9)で与えられる。

なお $G1$, $G2$ の符号は前述の操舵反力特性を得るために下記の通り与えられる。

$$\beta_{fr} \cdot \gamma > 0 \cdots \text{アンダステア} \quad (7)$$

$$G1 > 0, G2 = 0$$

$$\beta_{fr} = 0 \cdots \text{ニュートラルステア} \quad (8)$$

$$\beta_{fr} \cdot \gamma < 0 \cdots \text{オーバステア} \quad (9)$$

$$G1 < 0, G2 > 0$$

又、一般にこのような領域では操舵速度が高くなる傾向があり、車両の取れん性を更に高めるために、反力制御トルク $Tr2$ を補助的に与える。

$$Tr2 = C1 \cdot d\delta / dt \quad (10)$$

$$(C1 \text{ は係数})$$

従って、EPS の制御アシストトルク Tt は、停車中に操舵トルクを軽減するのに必要なアシストトルク Th から式(6), (10)を減算することにより与えられるので、操舵トルク Ts は、負荷トルクを Tl とすると

$$\begin{aligned} Ts &= Tl - Tt \\ &= Tl - (Th - Tr1 - Tr2) \end{aligned} \quad (11)$$

式(6), (7), (10), (11)より、ドリフトアウト時 β_{fr} が

大きな場合には、 $Tr1 > 0$ となり、運転者の操舵トルク T_s は重くなることが分かる。

又、式(6)、(9)、(10)、(11)より、オーバステア時には γ と $|\beta_{fr}|$ が大きくなり、 $Tr1 > 0$ になる。このとき操舵トルク T_s は重くなると共に T 方向に戻されるので、セルフアライニングトルクがアシストにより減少される量が小さくなる。更に γ と $|\beta_{fr}|$ が増大し $Tr1 > Th$ の時は、セルフアライニングトルクを加勢する方向に T_t が作用するので、運転者のカウンタ操作をアシストする。

4. アンダステア時に適用した場合の検討

アンダステア時に発生する車両のドリフトアウトについて検討する。非線形なタイヤ特性を用いた二輪モデルシミュレーションにおいて、低摩擦係数路(摩擦係数 $\mu = 0.2$)上を車速一定(40km/h)で走行中に、入力操舵角 θ の周波数をパラメータとして、振幅 θ (sin波)を変化させた場合における車両横移動量の算出結果を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 において、入力周波数を 0.2 から 0.25Hz に変化させた場合、車両移動量は β_{fr} が 6 度を越えた領域、すなわち操舵角 $\theta = 130$ 度を越えた領域で減少するので、運転者は β_{fr} を増大させないように運転をする。この領域はドリフトアウト領域であり、 β_{fr} を増大させない方法としては、

- (1) 操舵角 θ を増大させない
- (2) 加速力・制動力を増大させない

などの操作が必要であるが、ここでは、前者(1)について検討する。

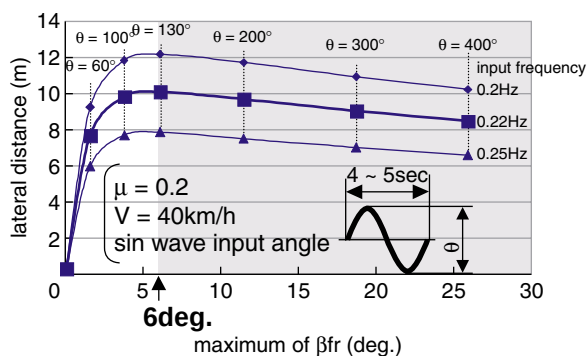


Fig. 7 Lateral distance in drift out area

4.1. 簡易シミュレータによる反力制御トルク $Tr1$, $Tr2$ の検討

前述したように、ドリフトアウト領域に入らないようにするために、 β_{fr} が増大したとき操舵トルク T_s を重くすることにより、運転者に対して操舵角を増大させないようにできるかどうかについて検討した。必要最小限の反力制御トルク $Tr1$, $Tr2$ の大きさを検討するために Fig. 8 に示

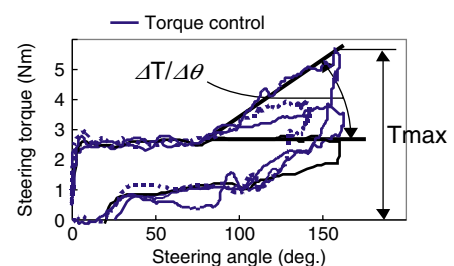


Fig. 8 Driving simulator

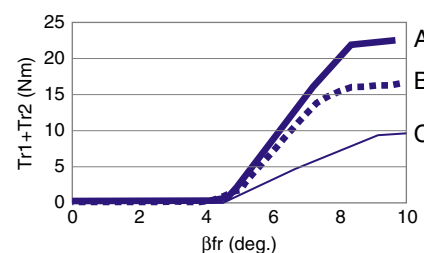
すシミュレータを用い⁽⁶⁾、低摩擦係数路と同等のタスクで操舵反力制御の効果を推定した。

このシミュレータは、操作目標となる車両の目標位置と現在の自車位置を示す横二列に並んだ LED 表示部(LED1, LED2)と、実際の反力を与える EPS ギヤボックスにステアリングホイールを連結した反力部により構成されている。表示部の自車位置(LED2)は、車両の一次遅れを反映し、被験者の操舵により横移動するよう設定されている。

被験者は一般の運転者 2 名、目標にエキスパート 1 名とし、Fig. 9 (b) に示すように β_{fr} に応じて反力制御トルク ($Tr1 + Tr2$) を変え、Fig. 9 (a) に示す様に複数の制御反力勾配 ($\Delta T / \Delta \theta$) を与えた。このときの運転者の最大操舵トルクと最大操舵速度を調査した。これは、一般に低摩擦係数路においては操舵速度が速くなる傾向にあるので、最大操舵速度を抑えることにより操舵角を増大せずに運転できると考えたからである。反力制御トルク ($Tr1 + Tr2$) に対する効果を Fig. 10 に示す。制御反力勾配 ($\Delta T / \Delta \theta$) が 0.25Nm/deg., 最大操舵トルク (T_{max}) 8.3Nm であれば、エキスパート同等の最大操舵速度に抑えられるという結果が得られた。



(a) Characteristics of torque



(b) ($Tr1+Tr2$) curves

Fig. 9 Steering torque on simulation

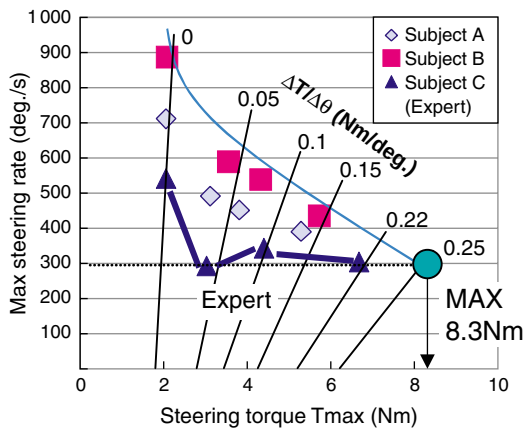


Fig. 10 Test result

4.2. 実走行テストによる効果確認

Fig. 11に示すように、アンダステア時の操舵反力制御の効果を確かめるために、低摩擦係数路においてドリフトアウト領域を使って走行するテストコースを設定した。

被験者は、女性1名を含め合計6名とし、操舵反力制御の有無によるテスト成績を比較した。反力制御トルク($Tr1 + Tr2$)は、前述したシミュレータで求めた値を用いた。

Fig. 12にテスト結果を示す。操舵反力制御を効かせた車両では、6名中5名(83%)が通過できたのに比べ、操舵反力制御の無い車両ではコースを6名中1名(17%)しか通過することができなかった。

ここで、操舵反力制御を効かせた車両でコースを通過できなかった被験者 a の操舵状況を調査するために、通過できた被験者 b と比較し Fig. 13 に示した。

コースを通過できなかった被験者 a は、操舵反力制御により操舵トルクが増大してもなお操舵を続けており、操舵反力制御の結果発生したトルクでは、操舵を抑えるために十分ではなかったことが分かる。Fig. 13に示すように、被験者 a はドリフトアウト領域において40m地点のパイロンを避けたために、大きく操舵角($\theta = 500$ 度、 $\delta = 33$ 度)を入力した結果、操舵の戻し操作が遅れてコースを逸脱し

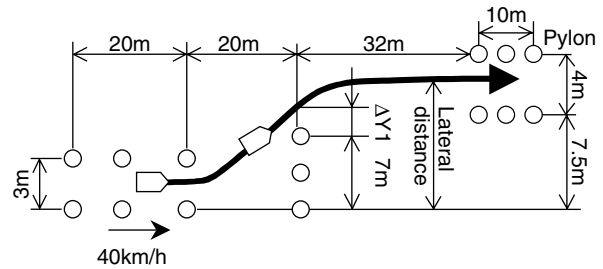


Fig. 11 Test course

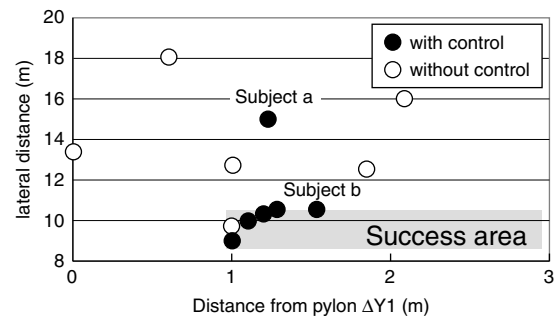
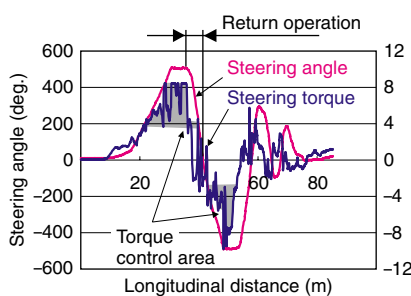
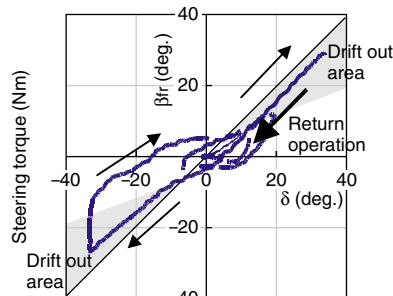


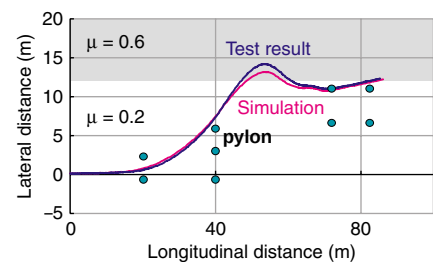
Fig. 12 Effect of steering torque control



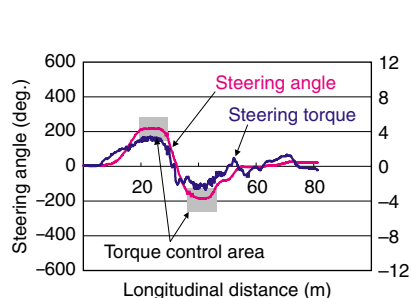
Steering operation (subject a)



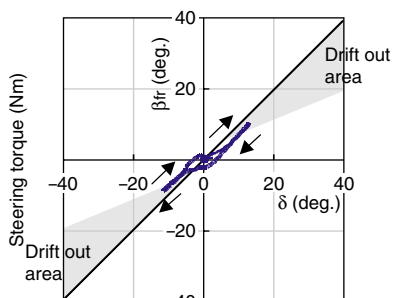
Driving diagram (subject a)



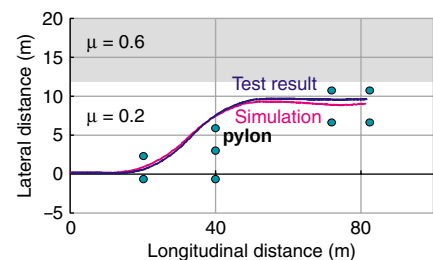
Locus of vehicle (subject a)



Steering operation (subject b)



Driving diagram (subject b)



Locus of vehicle (subject b)

Fig. 13 Test results

ている。一方、被験者 b は被験者 a とほぼ同じタイミングで操舵を始めたが、運転状態図に示すようにドリフトアウト領域において δ を増加させないように操舵した結果、コースを通過できている。以上から、アンダステア領域での操舵反力制御の有効性が確認できた。又、Fig. 13 に、前述の二輪モデルシミュレーションを用いた結果と実走行結果を付す。

5. オーバステア時に適用した場合の検討

オーバステア時に発生するスピンをリカバリするために、必要な制御量を検討する。

5.1. 反力制御トルク Tr_1 , Tr_2 の検討

スピンのリカバリについて、車両の γ が増加してからステアリング操作を開始するまでの運転者の応答時間の遅れに対して、必要な操舵速度の関係が報告されている⁽⁷⁾。

そこで、オーバステア領域において運転者の操舵遅れが、実際の程度なのか実走行テストを行い検討した。テストは、表 1 の被験者 4 名に対して実施し、Fig. 14 に示す低摩擦係数路におけるレーンチェンジ中に、車両の後輪をロックさせ、オーバステア状態を作り、このときの運転者の操舵遅れ時間、車両挙動等を計測した。

運転者の操舵遅れ時間は、後輪ロックにより γ が増加する点からカウンタ操作が始まるまでの反応時間とし、Fig. 15 のように定めた。

Table 1 Subjects list

Classification		Numbers
age	sex	
20's ~ 30's	male	2
40's ~ 50's	male	2

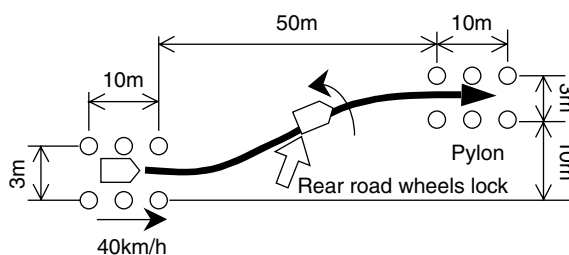


Fig. 14 Test course

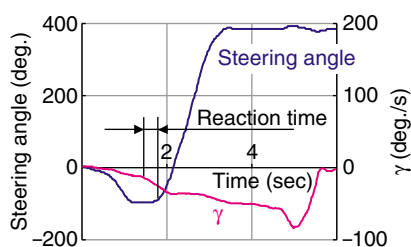


Fig. 15 Reaction time

テスト結果を Fig. 16 に示す。被験者 4 名中 3 名の運転する車両がスピンした。Fig. 16 の運転状態図から、被験者 D は δ に対する γ の上昇を止めることができず、又、A と C は γ の上昇を止めたが β_{fr} が大きくつき過ぎてスピンを止めることができなかった。従って、テスト条件や車両条件、特性によっても異なるが、スピン領域に入らないように、大きい操舵速度を入力する必要があることが分かる。

Fig. 17 は、二輪モデルによるシミュレーションによって、後輪ロックにより発生させた時のスピンのリカバリ性能について検討した結果得られたライン L に、Fig. 16 の実走行テストで得られた操舵遅れ時間と操舵速度を重ねてプロットしたものである。×で示される被験者はスピンを回避できず、○で示される被験者はスピンを回避することができたことを示す。ライン L で示される操舵速度以上の操舵速度を与えないとスピンしてしまう。

ここで、反応時間を短く操舵速度が大きくなるように反力制御トルクを加算するようにアシストできれば、スピンのリカバリが向上すると考えた。従って、Fig. 17 より、被験者 A, C, D は、ライン L c で示される操舵速度以上入力できているので、スピンのリカバリを可能とするために、前述した反力制御トルク ($Tr_1 + Tr_2$) により、操舵速度を約 200 deg./s 加算できるように G1, G2, C1 を設定した。

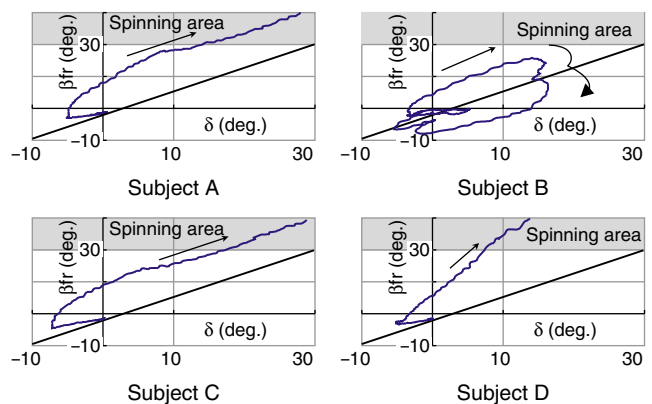


Fig. 16 Driving diagrams

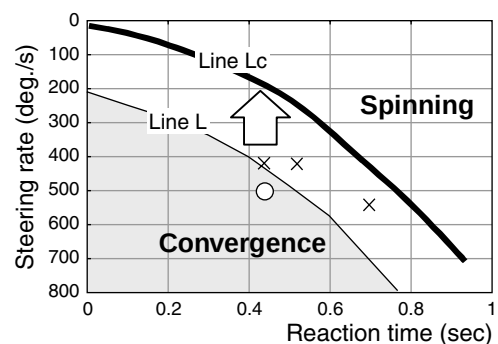


Fig. 17 Characteristics of steering wheel input to stop spinning

5.2. 実走行テストによる効果確認

Fig. 14のテストコースにより操舵反力制御の効果を確認した。

被験者は、テストの慣れを防ぐため同様の年齢集団から4名選んだ。Fig. 18 ~ 20の時系列データに示すように、オーバステアと同時に反力制御トルクが発生し運転者の操舵を補助する。 γ 増加時には、反力制御トルク $Tr1(\gamma$ 項)により、 γ を抑え、 $\gamma = 0$ 付近では、制御トルク $Tr1(\beta fr$ 項)により βfr を減少させる方向にアシストしていることが分かる。更に、Fig. 19の通り、粘性項である $Tr2$ により収れん性を向上させている。又、Fig. 20に、制御トルクの合成量を示す。

テスト結果を Fig. 21 ~ 24 に示す。被験者4名の運転する車両は、いずれもスピンに至らなかった。

運転状態図 Fig. 21の被験者Hにおいても、 $\delta = 12$ 度から βfr の上昇が抑えられていることが分かる。

また、Fig. 22の様に、○で示される反力制御の無い車両の被験者の結果に比べ、●で示される反力制御のある場合は、反力制御トルクにより操舵速度が増加され、Fig. 23に示すように操舵遅れ時間も短縮されている。

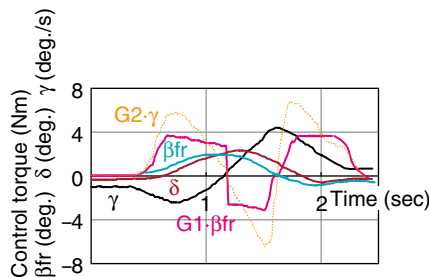


Fig. 18 Main control time chart

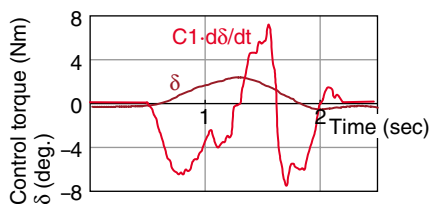


Fig. 19 Sub control time chart

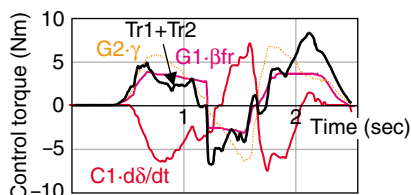
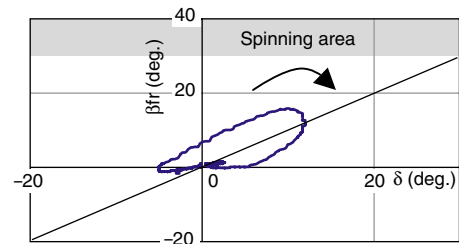
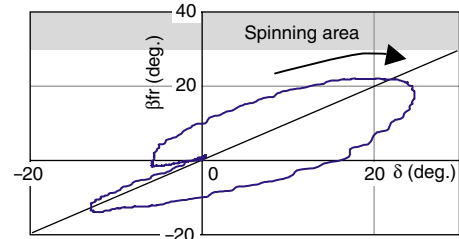


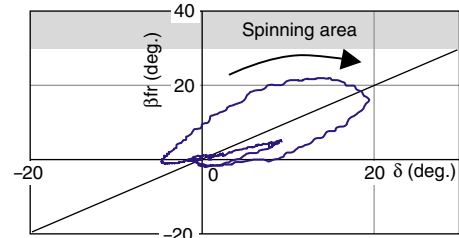
Fig. 20 (Tr1+Tr2) time chart



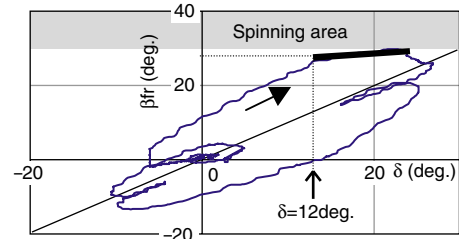
Subject E



Subject F



Subject G



Subject H

Fig. 21 Driving diagrams

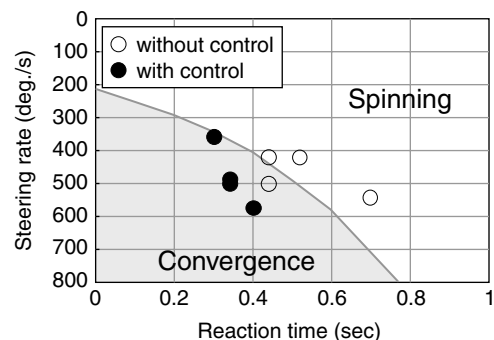


Fig. 22 Effect of steering torque control

又、Fig. 24に示すように、操舵遅れ時間に対するヨーレートピークも減少した。

これらから、スピン発生時のリカバリ性能の向上効果が確認された。

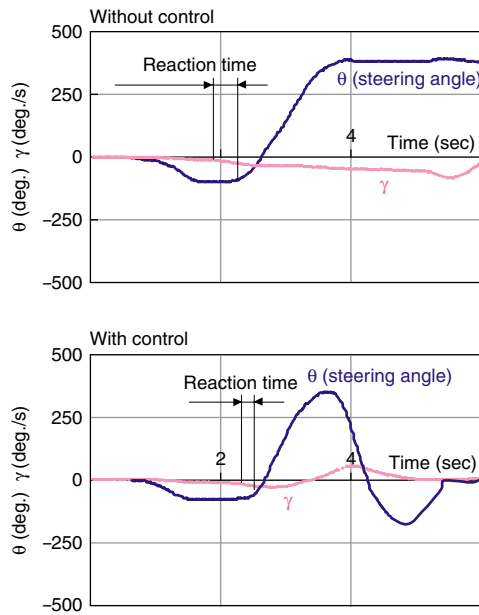


Fig. 23 Spinning recovery time chart

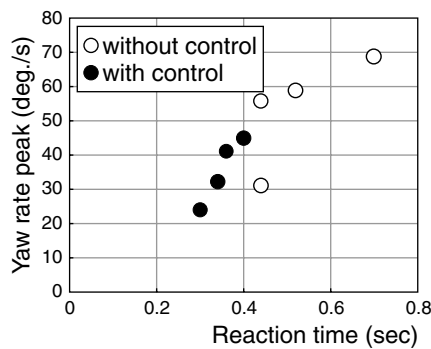


Fig. 24 Reaction time - yaw rate peak

6. まとめ

本研究では、車両の前輪の実舵角と前後輪の滑り角差を用いて、アンダステアやオーバステアの状態を把握する手法である運転状態図と、その状態図に基づいて操舵反力制御手法を考案し、この操舵反力制御手法を用いたEPS搭載車両を用い低摩擦係数路においてテストした結果以下のことを明らかにした。

- (1) 運転者が運転している時の車両の運転状態であるアンダステアやオーバステア領域は、 $\delta - \beta r$ を用いた運転状態図にて記述可能である
- (2) この運転状態図から、新しい操舵反力制御は、 βr と γ をゼロ方向に δ を操作するアシストであることを提案した
- (3) 運転状態図を用いることにより、アンダステアやオーバステア等を検出する手法を構築した

(4) アンダステア領域に適用した結果以下のことがわかった

1) 上記操舵反力制御に基づき、制御反力勾配を 0.25Nm/deg. 、最大トルクを 8.3Nm に設定した車両を使って、ドリフトアウトのテストを行った結果、6名中5名(83%)の被験者のテスト成績が向上した

2) 成績が向上しなかった被験者1名につき調査した結果、本研究で設定した制御トルクでも、十分ではないことがわかった

(5) オーバステア領域に適用した上記操舵反力制御に基づき、操舵速度を約 200 deg./s 加算できるような制御トルクに設定した車両を用い、スピンリカバリのテストを行った結果、テスト成績の向上が確認された

これらの見地から、運転状態図の有効性および運転状態図に基づいて考案した操舵反力制御の効果が確認できた。

参考文献

- (1) 山本真規：シャシのアクティブ制御による操安性向上技術，自動車技術，Vol.45, No.3, p.43-51 (1991)
- (2) N.Yuhara, S.Horiuchi, N.Asanuma, Y.Nishi, T.Kohata: Improvement of Vehicle Handling Quality Through Active Control of Steering Reaction Torque, Proc. of International Symposium AVEC, Yokohama, Japan, p.407-412 (1992)
- (3) 天野也寸志，土居俊一，川口裕：操舵特性可変制御による予防安全性の向上，自動車技術会論文集，Vol.30, No.3, p.87-92 (1998)
- (4) 安部正人：自動車の運動と制御，東京，山海堂，249p (1992)
- (5) 山脇茂，清水康夫：運転状態図を用いたオーバステア時における操舵反力制御とその効果，日本機械学会，交通物流部門大会，No.99-59, p.155-158 (1999)
- (6) 米田篤彦，清水康夫：高いステアリングゲインを持つ車両の制御成績に関する一考察，日本機械学会，交通物流部門大会，No.98-37, p.239-242 (1998)
- (7) 清水康夫，河合俊岳，杠順司，滝本繁規：ギヤ比が車速とハンドル舵角の関数にて変化するステアリングシステムの研究，HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.1, p.107-118 (1999)

■ 著 者 ■



山脇 茂



清水 康夫