

操舵による障害物回避操作の支援手法

Assistance Method of Obstacle Avoidance Maneuver by Steering Operation

藤原 幸 広*

Yukihiro FUJIWARA

照 田 八州志*

Yasushi SHODA

大 島 健 一*

Kenichi OHSHIMA

金 星 光 晴*

Mitsuharu KANABOSHI

要 旨

操舵によって障害物を回避するドライバの運転操作を支援するシステムについて、支援の方式と制御手法を検討した。運転操作の主体はドライバにあるという考えから、支援の方式は、ドライバの回避操作後に支援を始めるドライバリアクティブ方式とした。回避支援制御手法として、等価的に車両ヨー慣性モーメントを低減させる四輪制動力制御と微分ハンドル特性を実現することで、ドライバの回避操作遅れを改善させる操舵反力制御を開発した。実車テストの結果、回避操作時のヨーレートゲインを最大 1.5 倍まで高められ、さらに、操舵遅れを最大 700ms 低減できることから、ドライバの回避操作が改善されることを確認した。

ABSTRACT

Assistance types and control methods were studied, in regard to the system to assist driver maneuvers in avoiding obstacles through steering. From the principle that the driver is the focal point of driving operation, a “driver reactive” type of assistance was selected, wherein assistance begins after the driver initiates an avoidance maneuver. Actualization of a four-wheel brake control that equivalently reduces vehicle yaw inertia moment and derivative steering characteristics has enabled the development of a steering reaction torque control system, which reduces driver avoidance operation delay, as a new avoidance assistance control method. Vehicle test results have confirmed that yaw rate gain during an avoidance maneuver rises a maximum of 1.5 times, and that steering delay can be reduced by a maximum of 700ms; these have led to enhanced driver avoidance maneuvers.

1. まえがき

交通事故への対策として、事故時の安全性を高める衝突安全技術の進歩は目覚ましいものがあり、死亡事故の低減に大きく貢献している。しかし、事故件数が減少する傾向は見えない。この場合、事故防止を支援するシステムが有効と考えられており、自動車メーカー各社において、さまざまな事故未然防止や回避支援システムの開発が進められている^{(1)・(3)}。

このようなシステムを実現するには、レーダやカメラのような外界センサを用いて周囲の状況を認識し、事故が発生しそうな状況において、ドライバの運転操作を支援する機能が必要となる。しかし、現在の外界センサの認識能力の制約により、実用化されているシステムは警報システムの

ような事故未然防止技術が多い。一方、事故シーンを限定することによって、プリクラッシュセーフティとよばれる事故時の被害軽減技術も実用化されたが、外界センサを用いた回避支援技術⁽⁴⁾については、まだ研究段階にある。このような背景において、筆者らはプリクラッシュセーフティシステムである衝突軽減ブレーキ(CMS)⁽⁵⁾と本機能を連携させることによって、操舵による回避操作を支援するシステムを開発した。

本研究では、回避操作の主体はドライバにあるという考え方に基いて、支援方式を検討した。つぎに、ドライバの回避操作遅れを改善するために、等価的に車両ヨー慣性モーメントを低減させる制動力制御と電動パワーステアリング(EPS)を用いることによって微分ハンドル⁽⁶⁾を実現する操舵反力制御を検討した。

回避シーンとして、低 μ 路でのダブルレーンチェンジタスクを設定し、実車テストにおいてドライバの回避操作に対する改善効果を検証した。その結果、回避操舵時のヨーレートゲインを高め、回避操舵後の切り戻し操舵タイミングにおいて操舵反力を高める制御効果によって、ドライバの回避操作が改善されることを示す。

2. 開発の背景

Fig. 1 に、前方障害物に対してドライバが危険と認識した場合に取り得る回避行動の一例を示す⁽⁷⁾。これを見ると、ドライバの約9割以上がブレーキや操舵、あるいはその両方による回避行動をおこなうことがわかる。また、ドライバが危険状態を認知していない状態において、警報によってそれを知らせた場合、1秒後に約7割のドライバが反応するという結果が報告されている⁽⁸⁾。つまり、7割のドライバは不注意などによって危険状態を認識できていなくても、警報によって1秒後に回避操作をとることが可能であるといえる。

一方、圧雪路のように路面 μ が低い場合、上記のように警報によってドライバの回避操作遅れを改善しても、車両自体の応答遅れが大きいため、回避操作が難しくなる。また、操舵による回避操作をおこなった場合、その操作が不適切であると、スピンに至ることもある。

Vehicle Stability Assist system (VSA) などの車両安定化システムは、このような状況において作動するシステムであり、事故低減効果も報告されている⁽⁹⁾。また、常用領域から積極的に車両運動の安定化をおこなうことで、上記の状況に至らないように支援するシステムも実用化されている⁽¹⁰⁾。

しかし、このような従来システムでは、回避性能をさらに向上させるために、ドライバの回避操作を修正する考えはない。この理由として、回避操作を修正するには、回避の状況を把握する外界センサの情報が必要になるからである。したがって、車両運動の安定性を維持しながら、ドライバの回避操作を支援する機能を実現するためには、外界センサ情報を用いた車両運動制御が必要となる。

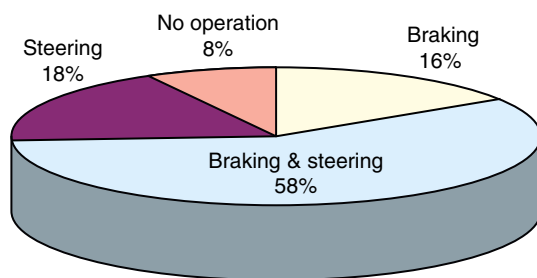


Fig. 1 Driver operation in an emergency avoidance (V=80km/h)

3. 回避操作支援の考え方

ドライバの回避操作遅れの補償方法について二つの考え方がある。一つは、回避操作の遅れが許容範囲を超えた場合、ドライバの操作に先んじてシステムが操作介入する方法である。この場合、操作遅れは確実に補償できるが、その前提として、外界認識能力は少なくともドライバの能力と同等のレベルが必要とされる。また、システムの操作介入が強いほど、ドライバとの操作干渉が大きくなるため、介入量には限界がある。CMSは、ドライバの回避操作遅れへの対応として自動ブレーキを用いているが、システムの作動範囲を衝突が避けられないというシーンに限定している。したがって、システムの作動範囲を回避可能領域まで広げることは、上記の点への技術的な見通しが得られない限り困難である。

もう一方は、ドライバの回避操作を検知し、その操作に対応した支援をおこなう考え方である(これを、ドライバリアクティブ方式とよぶ)。この場合、回避操作の主体を100%ドライバにおいた支援方法となるため、ドライバの操作遅れを確実に補償できるわけではない。しかし、外界センシングに対する要求性能は限定されるので、他方の考え方に比較して実用化しやすい。そして、このような考え方に基づいた実用化例もある⁽¹¹⁾。

本システムでは、運転操作の主体はドライバにあるという立場をとるため、後者の考え方であるドライバリアクティブ方式によって、システム構築をおこなう。そして、ドライバの操作遅れや低 μ 路における車両運動の応答性低下などに起因する遅れを改善することによって、障害物への衝突の可能性を低減させることを目的とする。

4. 回避操作支援システムの概要

4.1. システム構成

Fig. 2 にシステム構成図を示す。システム構成として、CMS, EPS, VSA の既存システムを用いて構築した。そして、これらの ECU を Control Area Network (CAN) を介して接続し、データ通信がおこなえるようにした。

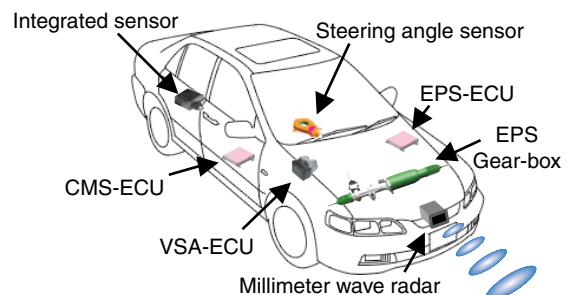


Fig. 2 System structure of obstacle avoidance operation assist system

4.2. 作動シーケンス

Fig. 3 に示すようにシステム機能は、回避ターゲット検知、回避操作判定、回避操作支援制御ブロックから成る。

回避操作判定ブロックは、衝突の可能性が高い場合において、ドライバの操舵による回避操作を判定する。判定値は、次式のように操舵角と操舵速度の線形2乗和を用いた。

$$O_t = m \cdot \theta_H^2 + n \cdot \dot{\theta}_H^2 \quad (1)$$

ここで、 m 、 n はチューニングパラメータ、 θ_H は操舵角である。

つづいて O_t が所定以上となった場合、回避操作がおこなわれたと判定し、回避操作支援制御ブロックにて回避に必要な回避ヨーレートを計算される。このとき、回避操作の完

了が判定されると、回避ヨーレートをゼロに収束させ、回避操作支援制御が終了する。

4.3. CMS との協調

本システムは、CMSの作動領域と重なるため、双方のシステムが干渉しないようにする必要がある。Fig. 4に機能連携例を示す。CMSの作動を優先するため、ドライバが制動のみによる回避行動をとる場合、本システムは作動しない。しかし、CMSの警報ブレーキ(Pre-braking)が作動する状態において、操舵による回避動作が判定された場合は、CMSから本システムへ移行し、回避操作支援制御が開始される。

一方、CMSの衝突軽減ブレーキが作動する状態では、操舵による回避によっても衝突が避けられないことから、仮

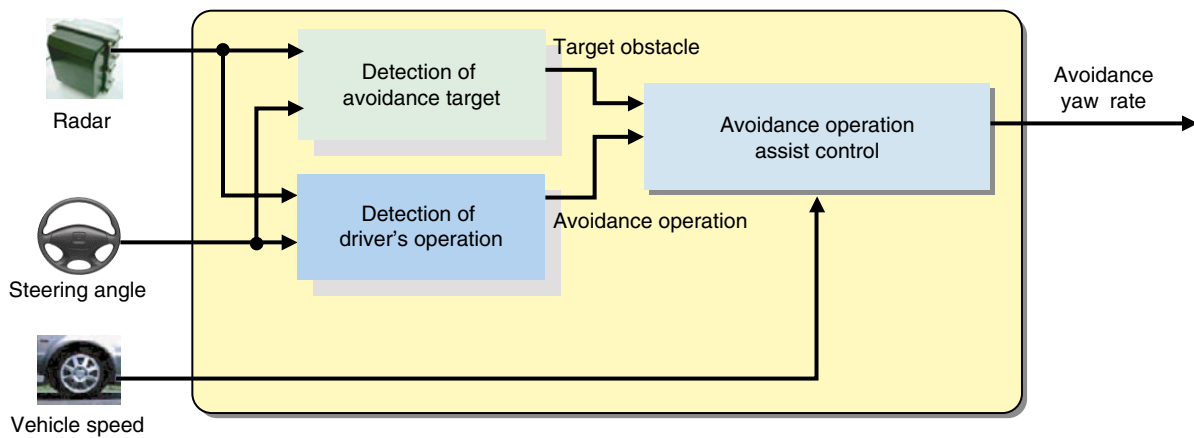


Fig. 3 Structure of obstacle avoidance operation assist function

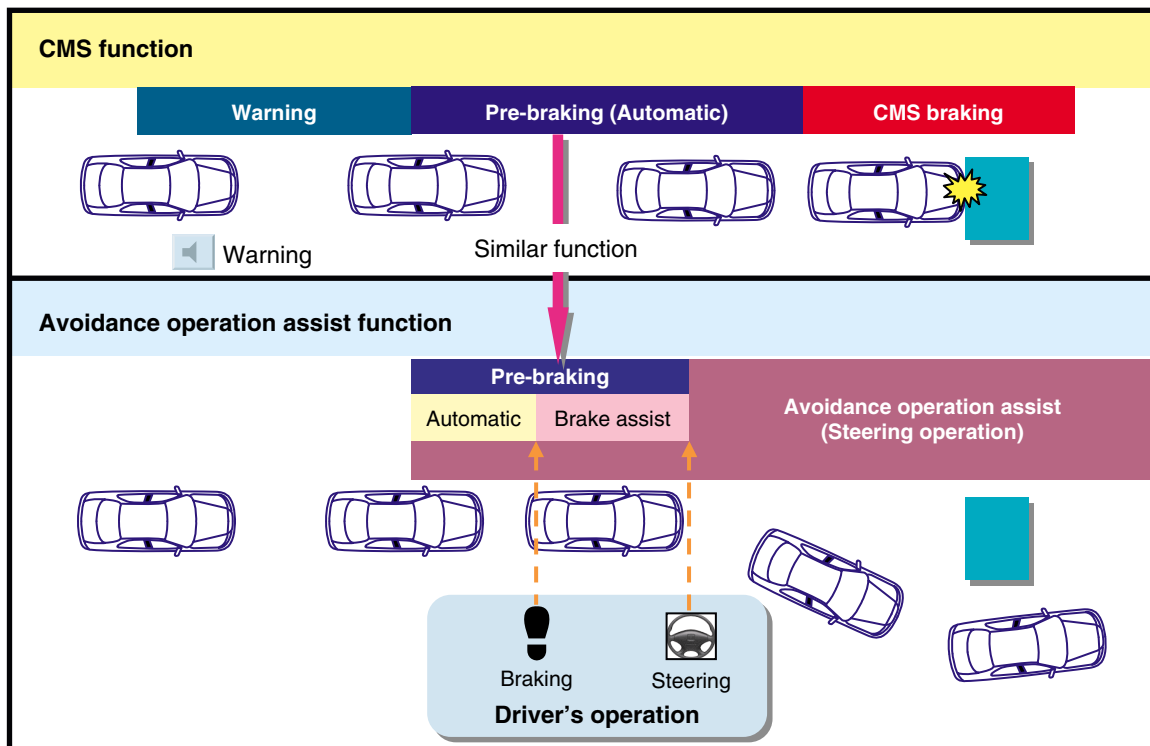


Fig. 4 Assist function comparison with CMS

にこの状態でドライバの操舵による回避がおこなわれても、本システムは作動しない。

5. 回避操作支援制御系の設計

回避操作の遅れを改善する方法として、操舵速度によるヨーモーメント制御が報告されている⁽¹²⁾。本研究では、この方法の実現手段として、制動力配分制御によるヨーモーメント制御を検討する。

一方、操舵入力に着目すると、ドライバの操作量である操舵角とシステムの操作量である操舵速度が車両への入力として加えられる。結果として、操舵入力は位相進み操舵(微分ハンドルとよぶ)となる。そこで、この微分ハンドルを実現する操舵反力制御についても検討していく。

5.1. 等価ヨー慣性モーメント低減手法

ここでは制動力配分制御によって、等価的にヨー慣性が低減できることを示す。

まず、ヨーモーメント T_m からヨー角加速度 $\gamma \cdot s$ までの関係は次のようになる。

$$J_V \gamma \cdot s = T_m \quad (2)$$

ここで、 J_V はヨー慣性モーメント、 s はラプラス演算子である。次に、操舵速度から補助的なヨーモーメントを発生させる制御 $J_V K \theta_H \cdot s$ を考え、式(2)に加える。すると、

$$\gamma \cdot s = \frac{1}{J_V} (T_m + J_V K \theta_H \cdot s) = \frac{1}{J_V} T_m + K \theta_H \cdot s \quad (3)$$

また、操舵角からヨーレートまでの伝達特性を次のように定義する。

$$\gamma = F(s) \theta_H \quad (4)$$

ここで、式(3)、(4)から次式が求まる。

$$\gamma = \frac{F(s)}{J_V(F(s) - K)s} T_m \quad (5)$$

つまり、式(5)は、次式のようにヨー慣性モーメントを変化させていることを意味する。

$$\tilde{J}_V = J_V \frac{F(s) - K}{F(s)} \quad (6)$$

したがって、操舵速度ゲイン K を適切に設定することによって、ヨー慣性モーメントを等価的に小さくすることができる。

5.2. 操舵反力による微分ハンドル効果

一般的な車両ではドライバの操舵角と独立して前輪操舵角を変えることができないため、ステア-バイ-ワイヤのよ

うなアクチュエータシステムでなければ微分ハンドルは実現できない。

そこで、操舵反力を与えることによって、ドライバの操舵自体の位相を進めることで微分ハンドル効果を実現する。

まず、ドライバの操舵角から次式を定義する。

$$S_{rto} = \alpha \cdot \theta_H + \beta \cdot \dot{\theta}_H \quad (7)$$

これを微分ハンドルレシオとよび、取り得る値の範囲をつぎのように定義する。

$$-1 < S_{rto} < 1 \quad (8)$$

ここで、パラメータ α 、 β はセッティングパラメータである。

つぎに、回避しようとする障害物の大きさ $d_{\max}$ を考慮して、以下のように回避目標横移動量を求める。

$$dist_{ref} = d_{\max} \times S_{rto} \quad (9)$$

さらに、ドライバの操舵回避を許容する最小の衝突余裕時間 TTC を $TTC_{\min}$ とすれば、式(9)で示される目標横移動量は、次のように回避に必要な横加速度として表すことができる。

$$G_a = \frac{dist_{ref}}{TTC_{\min}^2} \quad (10)$$

一方、ヨーレートと横加速度は次式の関係をもつことが知られている⁽¹³⁾。

$$G_l = V(\gamma + \dot{\beta}) \quad (11)$$

ここで、 G_l は横加速度、 V は車速、 γ はヨーレート、 β は横すべり角である。このとき、横すべり角の発生が十分小さいと仮定すると、回避に必要な横加速度を得るために必要なヨーレートは、式(11)より次のようになる。

$$\gamma = \frac{1}{V} G_l \quad (12)$$

したがって、回避に必要な横加速度 G_a をヨーレートで表すと、次のようになる。

$$\gamma_a = \frac{1}{V} G_a \quad (13)$$

このようにして求めた回避ヨーレート γ_a と実ヨーレートの偏差を用いることによって、ドライバの操舵量が微分ハンドル特性に近づくように操舵反力を発生させる。

5.3. 回避操作での車両安定化補正

低 μ 路における回避操作時では、一般的に車両の横すべりが発生しやすく、ヨーレートと横加速度の関係が式(12)の近似を満たさなくなる。したがって、この式に基づいて

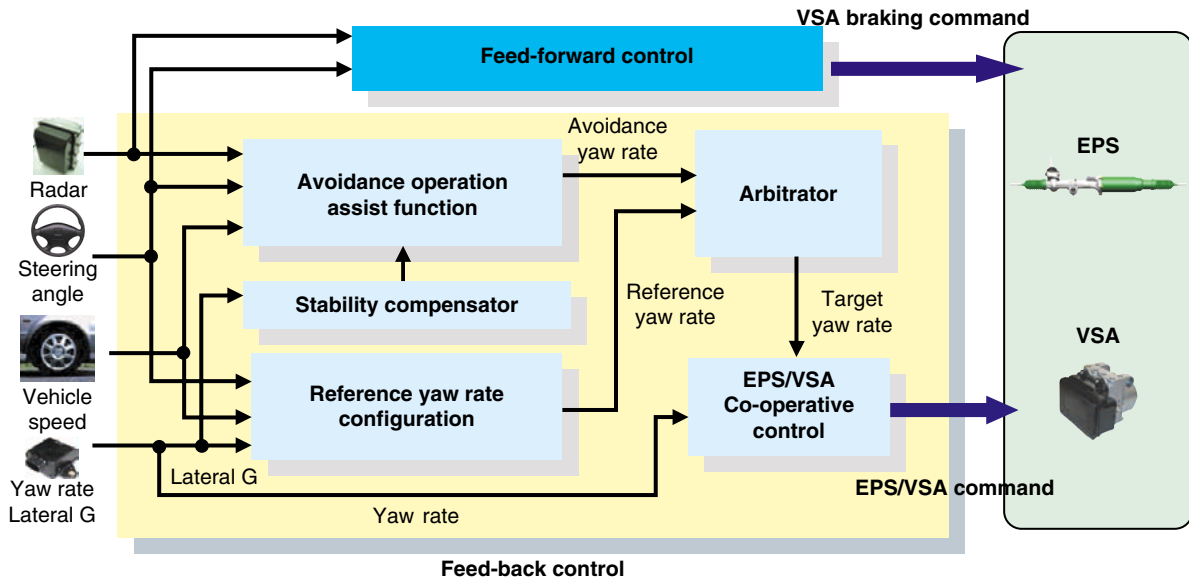


Fig. 5 Control system structure of obstacle avoidance operation assist system

ヨーレートを発生させる制御をおこなうと、大きな横すべり角が発生し、車両安定性が損なわれる。

そこで、車両の運動状態やレーダ情報から回避支援制御を中断し、ヨーレートを減衰させるための安定化補正を追加した。なお、実車を用いた予備実験の結果から、安定化補正をおこなうために以下の条件を設定した。

- ・横すべりが発生しそうなとき

$$|\gamma| - |G_l| < 0 \quad (14)$$

- ・障害物の回避が確実となったとき

$$|d_{ofs}| > d_c \quad (15)$$

- ・障害物を検知できなくなったとき

$$|d_{ofs}| > L_x \tan^{-1} \theta \quad (16)$$

なお、 d_{ofs} はレーダによって検知されるオフセット距離、 d_c は回避可能判定値、 L_x は障害物までの距離、 θ はレーダの検知角である。以上の考え方に基づいて構成した回避支援制御系を Fig. 5 に示す。

6. 実機テスト結果と考察

6.1. テスト条件

システムの機能／性能確認をおこなうために、Fig. 6 のようなダブルレーンチェンジコースを設定した。また、前方障害物に対して直進走行し、衝突警報によって危険を認識し、ブレーキングによる回避行動をとった後、操舵によって回避を試みるという回避シナリオを設定した。

テストで用いた車両は、3.0L クラスの乗用車であり、スタットレスタイヤを装着した。

車両の走行条件として、路面 μ は 0.3、車速は 60km/h 一定で直進走行し、衝突余裕時間が 3 秒の時点で警報を発生させて、ドライバに衝突危険性を知らせた。

回避行動として、警報後ドライバにブレーキによる回避行動をとらせ、この状態で障害物手前 22m (TTC=1.32 秒) で操舵による回避をおこなわせた。なお、被験者は 20 代から 40 代の一般的な運転スキルを持つ男性 5 人である。

6.2. テスト結果

Fig. 7 の上段に回避操作時のヨーレート応答および下段に操舵角を示す。これらの図は、被験者 5 人分のデータを回避操作支援制御ありと制御なしで示したものである。これを見ると、すべての被験者について、ヨーレート応答は制御なしに比べて、制御ありの方が改善されており、Fig. 7 の上段において、矢印で示すようにヨーレートゲインのピーク

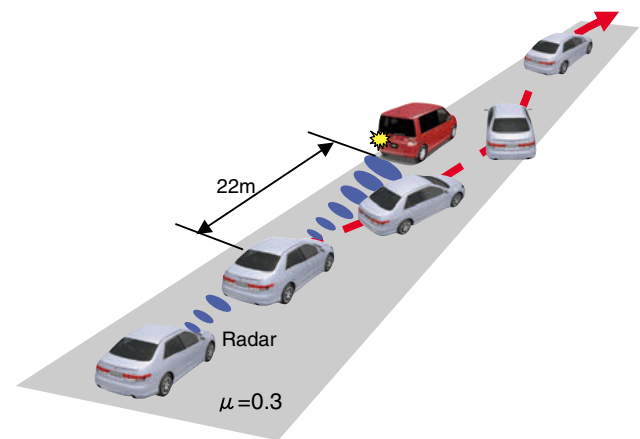


Fig. 6 Control system structure of obstacle avoidance assist system

値の平均が約 1.5 倍大きくなっている。また、操舵遅れも同様にすべての被験者で改善されており、下段の図で示すように回避からステアリングの中立位置を横切るまでの時間が平均で 700ms 早くなっている。

Fig. 8 の上段に横加速度応答、下段に操舵反力トルクを示す。これをみると、矢印で示すように横加速度のピークが平均 0.5m/s^2 増加している。また、操舵反力トルクにおける特徴的な事象は、点線で囲んでるように回避操舵から

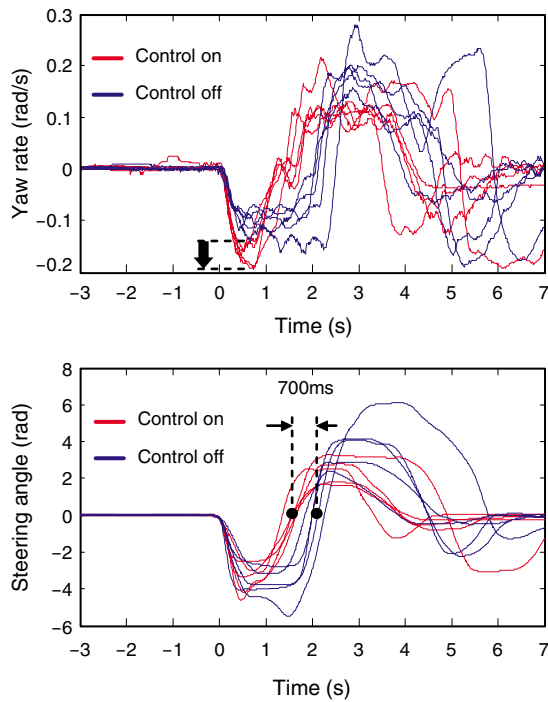


Fig. 7 Test results of total subjects

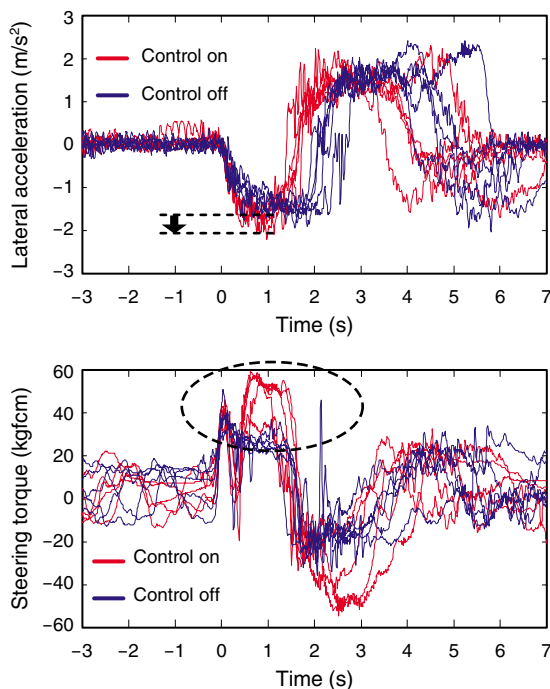


Fig. 8 Test results of total subjects

ステアリングを切り返すところで、反力が大きくなっていることであり、ドライバに対する切り過ぎ抑制効果と戻し操舵の支援効果があらわれている。制御なしの場合は、この操舵反力インフォメーションの発生はないため、操舵力の変化はない。

Fig. 9, Fig. 10 に被験者Aのテスト結果を示す。この図は、制御ありと制御なしで、それぞれ5回づつの回避データをプロットしたものである。被験者Aは制御なしにおいて、

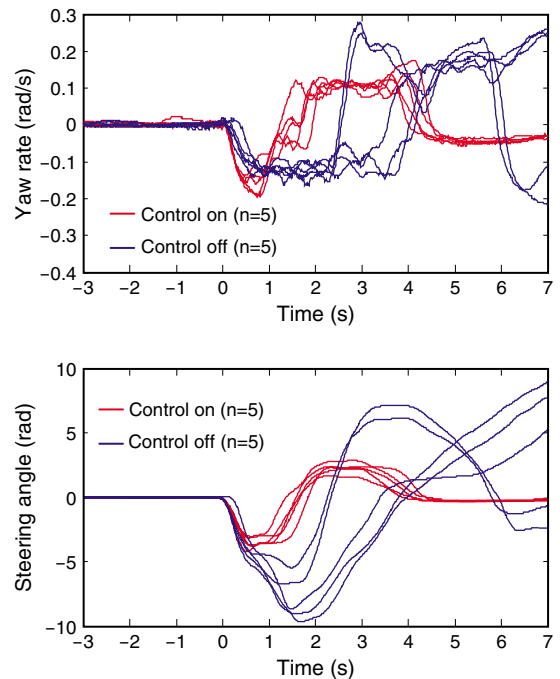


Fig. 9 Test results of subject A

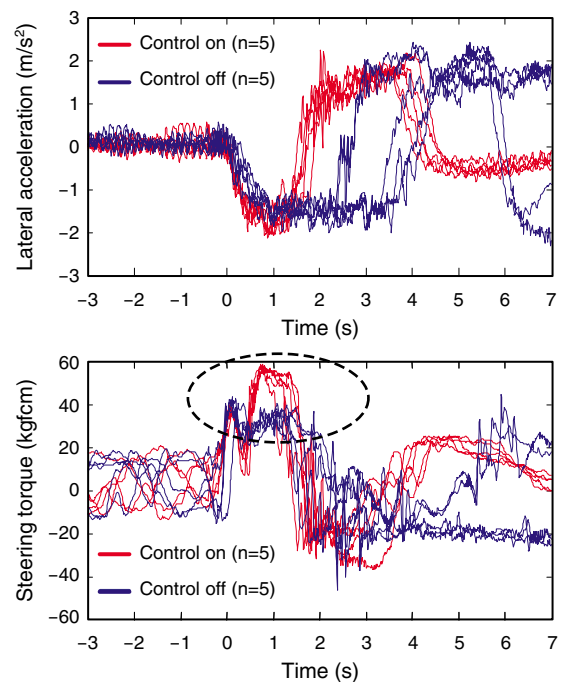


Fig. 10 Test results of subject A

回避操作の遅れがもっとも大きく、ほとんど回避を失敗した。しかし、制御ありではヨーレートの応答性、操舵遅れともに大きく改善され、さらに、Fig. 10の点線で示すように切り戻し操舵時に操舵反力が大きくなり、反力インフォメーションの効果も確認できる。このように、他の被験者とはほぼ同等の回避操作をおこなうことができ、今回のテストにおいては回避の失敗がなくなった。

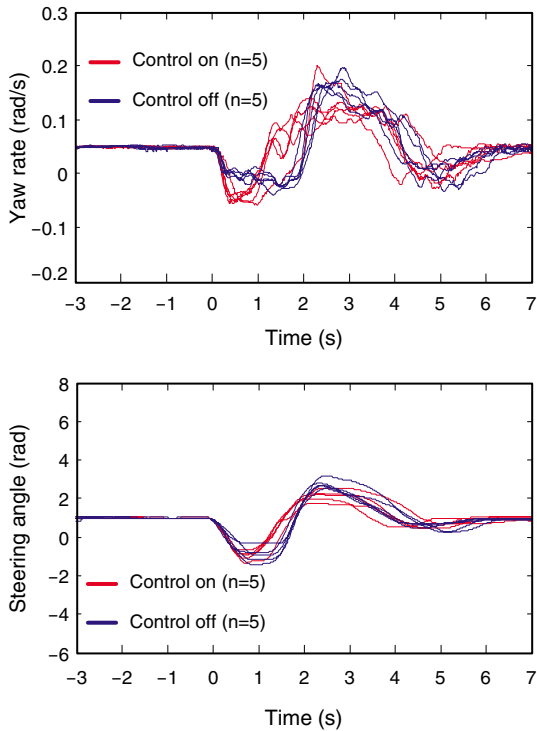


Fig. 11 Test results of subject B

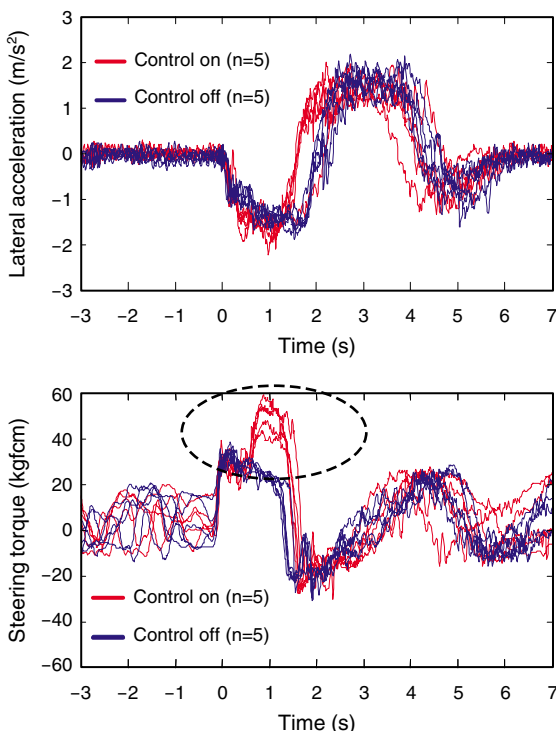


Fig. 12 Test results of subject B

Fig. 11, Fig. 12に被験者Bのテスト結果を示す。この場合、制御なしにおいても障害物をうまく回避できており、結果として、制御ありの場合に比較して違いが少なかった。しかし、テスト後の聞き取り調査において、制御ありの場合、回避時の操作性の改善効果がはっきりわかるという評価を得た。

6.3. 考察

テスト結果から、以下の効果を確認した。

(1) ヨーレートゲインの向上

(2) 回避操舵遅れの改善

(3) ドライバ操作に対する操舵反力インフォメーション

(1)については、制御なしに比較して、操舵角が小さくなっているにもかかわらずヨーレートゲインが大きくなっている。さらに、テスト後の聞き取り結果でも、全被験者から、アンダーステア感の解消によって回避がしやすくなっているという評価が得られた。一般的に車両のヨー慣性モーメントを小さくしても同様の効果が得られることから、等価ヨー慣性モーメント低減手法の妥当性が実証されたといえる。

一方、(2)、(3)についてはドライバの操舵遅れに対する改善効果を示している。この点について、制御なしで回避に失敗した被験者においても、制御ありの場合、回避に成功している。したがって、熟練したスキルをもつドライバより、操舵遅れが大きい一般的なスキルをもつドライバに対して改善効果が高いといえる。

以上の点から、本システムは、ドライバ・車両系における回避操作の支援について十分な効果を持っていることがわかる。しかし、衝突回避成功率については、制御ありと制御なしについての差が小さく、衝突を回避するという性能を向上させるためには、外界センシングや車両制御デバイス(例えばステア-バイ-ワイヤなど)の進化がさらに必要である。

7. まとめ

前方回避物の回避操作を支援するシステムを検討し、実車実験によって、その回避操作支援機能の効果を確認した。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 操舵速度に応じた制動力左右配分制御によってヨーモーメントを発生させることで、車両のヨー慣性モーメントを等価的に低減でき、障害物回避時における車両のヨーレート応答性が向上した。

(2) 微分ハンドル入力を仮定した回避目標ヨーレートを設定し、EPSの反力制御によって、ドライバの操作遅れを低減する支援効果を確認した。

(3) ダブルレーンチェンジタスクを用いて回避テストをおこなった結果、操作遅れが大きくなる一般的なス

キルをもつドライバほど改善効果が高くなることを確認した。

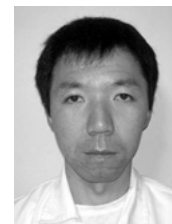
参考文献

- (1) 間下 博, 古川 修, 浅沼信吉, 福丸智之, 加世山秀樹:
Honda ASV-2 インフラ連携実験車の紹介(乗用車),
Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.1-6
- (2) 野中正勝, 井垣宗良, 堀 義人:先進安全自動車トヨタ
ASV-2, TOYOTA Technical Review, Vol.51, No.1, p.42-
47(2001)
- (3) 安田 徹, 小原英郎, 松本真次:日産 ASV-2 について,
NISSAN TECHNICAL REVIEW, No.48, p.57-60(2001)
- (4) 鈴木達也, 高浜 琢, 木村 健, 松本真次, 内藤原平:ブ
レーキ制御による衝突事故回避システムに関する研究,
自動車技術会 学術講演会前刷集, No.114-02, p.13-16
(2002)
- (5) 小高賢二, 杉本洋一, 小田部 誠, 市川章二, 浦井芳洋:
追突速度低減システムの開発, Honda R&D Technical
Review, Vol.13, No.1, p.159-166
- (6) 高橋 淳, 佐藤 睦, 堀内伸一郎:ドライビングシミュ
レータを用いた微分ハンドル操舵車の評価, 自動車技
術会関東支部学術研究講演会前刷集(2003)
- (7) 山本 敦:マンーマシン系を考慮した事故回避性能の向
上, 自動車技術, Vol.49, No.12, p.10-15(1995)
- (8) 上地幸一, 小高賢二, 赤羽 博:ホンダブリクラッシュ
セーフティテクノロジーの開発, Honda R&D
Technical Review, Vol.16, No.2, p.115-120
- (9) 稲垣匠二:トヨタ VSC による予防安全性能向上, 日
本機械学会誌, Vol.106, No.1012, p.154-155(2003)
- (10) 服部義和, 鯉渕 健, 横山竜昭:4 輪制駆動力の非線形
最適制御による車両運動性能の向上, 自動車技術会
学術講演会前刷集, No.10-02(2002)
- (11) 市川勝文, 松浦宗徳, 富岡勝巳:VDCのプレビュー制
御開発, SUBARU Technical Review, Vol.28, p.115-120
(2001)
- (12) 土居俊一, 名切末晴, 天野也寸志:ドライバの緊急操
作挙動に基づく車両の予防安全性能解析, 豊田中央研
究所 R&D レビュー, Vol.33, No.1, p.31-38(1998)
- (13) 安部正人:自動車の運動と制御, 第二版, p.55(2003)

■ 著 者 ■



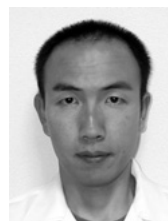
藤原 幸広



大島 健一



照田 八州志



金星 光晴