

技術論文

車体スリップ角低減に着目した
後輪操舵システム

福川 将城
Shogi Fukukawa
藤田 好隆
Yoshitaka Fujita

土屋 義明
Yoshiaki Tsuchiya
山本 拓哉
Takuya Yamamoto

概要

近年、後輪操舵(4WS)は、BEVのホイールベースを延長するためのソリューションとして、また大きな操舵角システムを備えた運転手用車両のために広く採用されている。中速域では、このシステムはヨー応答を改善するために一般的に使用されている。今回は、中速域で車体のスリップ角が正であることに着目し、それを減少させ車体を進行方向に合わせることで運転性が向上する可能性があると考えた。実車を使用してその有効性を確認するだけでなく、ドライバーの特性についても調査を行ったので報告する。

1. まえがき

1980年台に製品化された後輪操舵(以下4WS)は、2000年台後半に欧州を中心に採用が拡大してきた。2012年には国内でも復活するが一部車種に限定して採用されるにとどまっていた。近年になり電動車のホイールベース延長に伴う回転半径拡大への対策や後席の快適性を狙いとした大舵角後輪操舵システムの採用が広がりはじめている。

これまでの後輪操舵は

- ・微低速: 最小回転半径短縮
- ・低速: 取り回し性向上
- ・中速: 操舵応答向上(ヨー応答)
- ・高速: 車両安定性向上(車両姿勢)

を狙いとしたが、後輪操舵は車体スリップ角(車両姿勢)とヨー応答のどちらか一方しか実現できず、もう一方は自動的に特性が決まってしまう為、車両姿勢とヨー応答それぞれをつなぐ車速域では明確に目標を定めることが困難であった。今回、低速から高速まで車体スリップ角に着目して検討を行い、運転のし易さに繋がる知見を得た。ドライバー特性も併せて調査した結果を報告する。

2. 車両のシステム構成と後輪操舵制御則

本章は、対象となる車両のモデル式および制御のシステム構成とその制御定数設定の考え方を示す。対象とする前後輪操舵の車両を式(1)~(4)のような線形二輪モデル¹⁾で示す。

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = -2K_f \alpha_f - 2K_r \alpha_r \quad (1)$$

$$I_z \frac{d\gamma}{dt} = -2l_f K_f \alpha_f + 2l_r K_r \alpha_r \quad (2)$$

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f}{V} \gamma - \delta_f \quad (3)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{l_r}{V} \gamma - \delta_r \quad (4)$$

ただし、各パラメータは次の通りである。

m : 車両重量[kg],

V : 車体速度[m/s],

β : 車体スリップ角[rad],

γ : ヨーレート[rad/s],

I_z : ヨー慣性モーメント[kgm²],

α_f, α_r : 前後輪スリップ角[rad],

l_f, l_r : 重心-前後車軸間距離[m],

δ_f, δ_r : 前後輪操舵角[rad],

δ_{MA} : ステアリング角度[rad]

k : ステアリングギア比,

K_f, K_r : 前後輪コーナリングスティフネス[N/rad]

本制御のシステム構成を図1に示す。

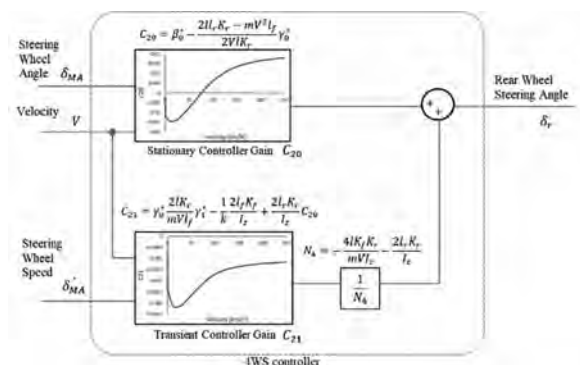


図1 4WS制御システム図

前後輪のステア角は式(5),(6)となる。

$$\delta_f = \frac{1}{k} \delta_{MA} \quad (5)$$

$$\delta_r = \left(C_{20} + \frac{s}{N_4(s)} C_{21} \right) \delta_{MA} \quad (6)$$

C20は操舵角度に対する定常ゲイン, C21は操舵角速度に対する過渡応答ゲインで各車速に対するマップとしている。車体スリップ角ゲイン定常項(以下 β_0^*)、ヨーレートゲイン定常項(以下 γ_0^*)、ヨーレートゲイン過渡項(以下 γ_1^*)を設定する事でC20, C21が求まる。

$$C_{20} = \beta_0^* - \frac{2l_r K_r - mV^2 l_f}{2Vl_r K_r} \gamma_0^* \quad (7)$$

$$C_{21} = \gamma_0^* \frac{2l_r K_r}{mVl_f} \gamma_1^* - \frac{1}{k} \frac{2l_f K_f}{l_z} + \frac{2l_r K_r}{l_z} C_{20} \quad (8)$$

ただし、 β_0^* と γ_0^* には式(9)の関係があり、 β_0^* を減少させると γ_0^* は増加する関係にある。また式(7)に(9)を代入すると式(10)を得る。本検討では本式を用いてC20を算出した。

$$\gamma_0^* = \frac{2Vl_r K_f}{2l_f K_f + mV^2 l_r} \left(\frac{1}{k} - \beta_0^* \right) \quad (9)$$

$$C_{20} = (1 + a) \beta_0^* - a \frac{1}{k} \quad (10)$$

$$a = \frac{K_f \frac{2l_r K_r - mV^2 l_f}{K_r \frac{2l_f K_f + mV^2 l_r}}}{K_r \frac{2l_f K_f + mV^2 l_r}} \quad (10)$$

図2に従来の4WSの目標特性の内、 β_0^* を2WSとの比較で示す。各車速における車両特性の狙いは以下である。

- ①微低速:最小回転半径短縮
- ②低速:取り回し性向上
- ③中速:ヨー応答の向上
- ④高速:車両安定性向上

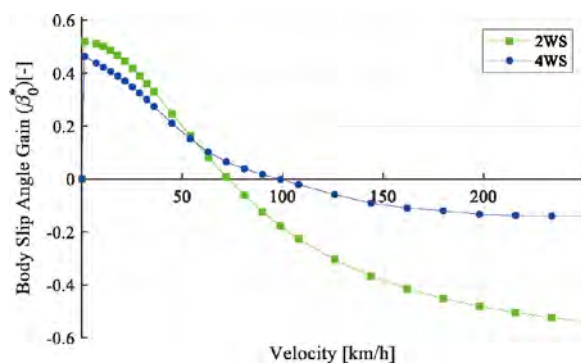


図2 車体スリップ角ゲイン特性

3. 車体スリップ角の検証

3.1 車体スリップ角の適値

図3に β_0^* の適値について検討した結果を、2WSとヨー応答の向上を目的とした市販車との比較で示す。試験は交差点を含む市街地路とワインディングを20～

80km/hで走行し、10km/h毎に β_0^* を変更して行った。評価は定常旋回中の運転のしやすさについてコーナーの見えやすさ、舵の合わせやすさの観点から実施した。結果、特に40km/h以下では自転感が生じたり、旋回中に内側に寄り過ぎる感覚でステアリングを戻す操作が必要になるなど β_0^* を過度に小さくすると違和感が発生し、 β_0^* に適値が存在することがわかった。

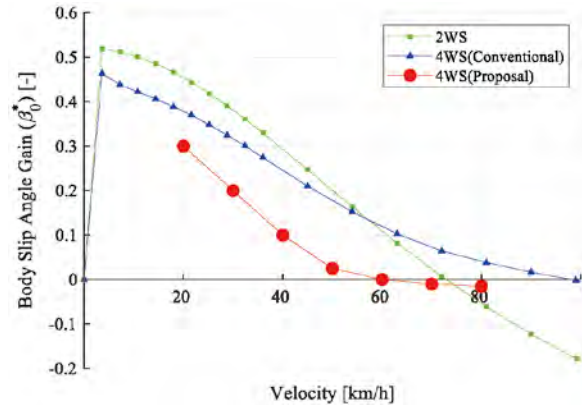


図3 車体スリップ角ゲイン調査結果

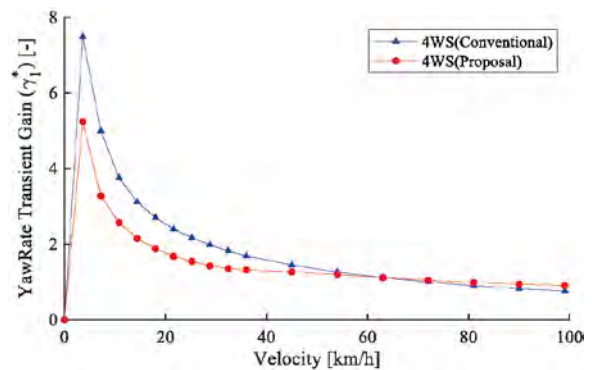


図4 ヨーレート過渡ゲイン適合結果

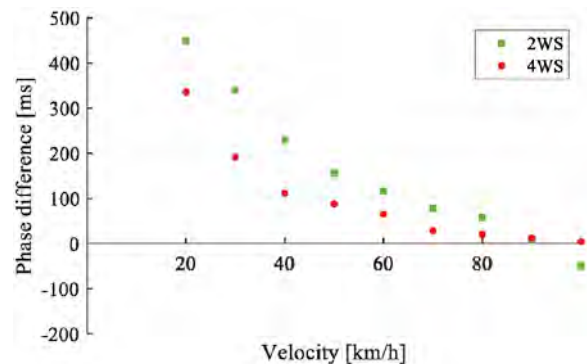


図5 ヨーレートと横Gの位相差

次に操舵の過渡域で自然なフィーリングを達成するため、微低速域で横Gとヨーレートの関係性を線形化することで違和感解消を達成したとする文献[3]を参考に γ_1^* を適合した結果を図4に示す。図3と図4の特性とした車両で、レーン幅3.5m内で0.3Hzの正弦波入力時の横Gとヨーレートの位相差を測定した結果を図5に示す。位相差は2WSに対し低速程大きく、30km/hで約150ms低減した。

3.2 目標車両特性

図3と図4を基本にシステム最大切れ角10degとし、図2の低速と高速を採用した車両特性を図6～9にシステム特性を図10, 11に示す。特徴は、 $\beta 0^*$ の低下(図6)によって定常特性の逆相操舵量が大きくなっていることであり、30km/hでは市販車の約2.3倍と増加(図10)した結果、交差点右左折では6deg以上の切れ角となる。

同様に $\gamma 0^*$ も増加し、30km/hでは市販車の約1.2倍となる。

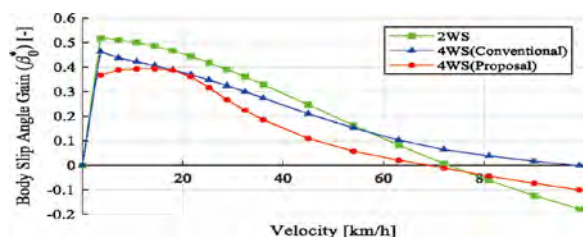


図6 車体スリップ角ゲイン特性

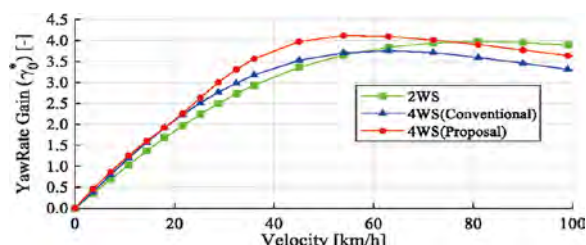


図7 ヨーレートゲイン特性

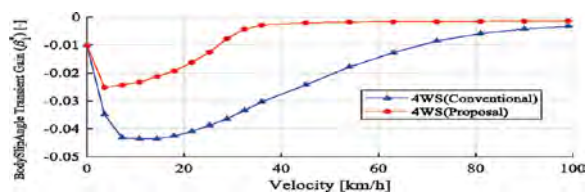


図8 車体スリップ角過渡ゲイン特性

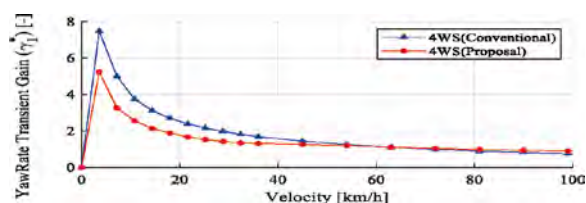


図9 ヨーレート過渡ゲイン特性

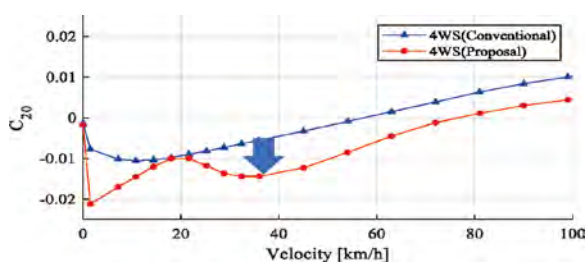


図10 C20マップ

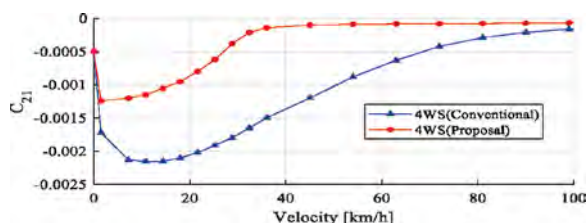


図11 C21マップ

4. 様々なドライバーによる評価

4.1 ドライビングシミュレータによる検証

様々なドライバーによる検証を目的にドライビングシミュレータを使った比較映像を図12に示す。R35左コーナーを30km/hで走行した際の車体スリップ角は2WS:2.4degに対し4WS:1.2degと低減し、視覚上もその違いは認識できる。しかし、操舵フィーリングが実車と大きく異なるため運転のし易さの評価は難しいと考えた。

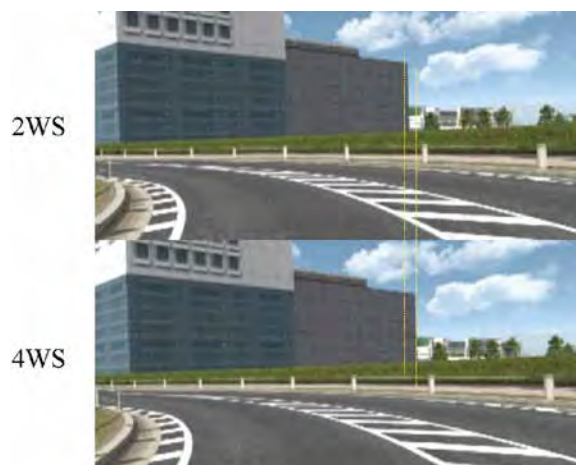


図12 運転中の車両前方映像

4.2 操舵フィーリングの影響

実車での評価を行う場合、操舵トルクが非常に大きい影響を与えることがわかっている。今回操舵トルクの影響を極力排除するため、2WSと4WSの操舵フィーリングが同じとなるよう以下項目のEPS定数を変更した。

- ① 入力トルク・アシストトルク特性
- ② ステアリング減衰特性
- ③ 舵角/トルクのヒステリシス特性
- ④ ハンドル戻り特性

変更後の操舵トルクとヨーレートの関係を図13～図16に示す。30km/h、60km/h共に2WSと4WSの特性をほぼ同一にすることができた。

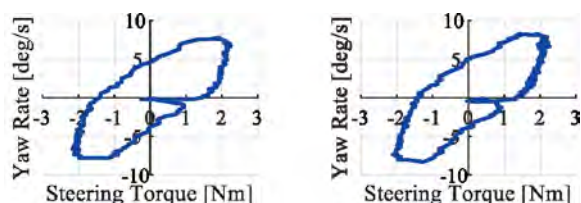


図13 2WSステア特性 (30km/h)

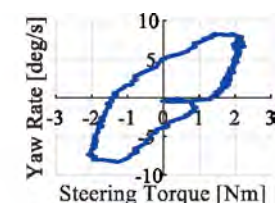


図14 4WSステア特性 (30km/h)

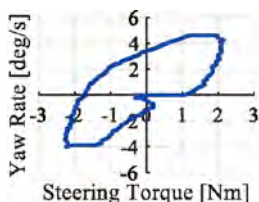


図15 2WSステア特性 (60km/h)

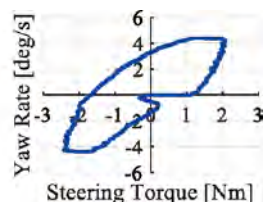


図16 4WSステア特性 (60km/h)

4.3 実車評価結果

運転歴の浅いドライバーからエキスパートまで様々な運転レベルの方に試乗してもらい運転のし易さを評価してもらった。なお、参加者には実験前に実験内容および個人情報保護について説明を実施、評価目的の理解と同意を得たうえで実験を実施している。

評価方法は、予め定めた市街地路(MAX40km/h)、ワインディング路(MAX70km/h)を走行してもらい、どちらが運転しやすいかのみをコメントしてもらうことにした。ただし試乗前に条件(2WS, 4WS)は知らせず、順序もランダムとした。集計結果を表1に示す。運転スキルの高いドライバー(以下上級者)は全員4WS > 2WSで、スキルが高い程4WSの評価が高かった。逆に運転歴の浅いドライバー(以下、初級者)は 全員4WS < 2WSで評価が逆転した。尚、車体スリップ角が2WSと4WSで違うことに気づいたドライバーは初級・上級者ともに皆無であった。

表1 実車評価結果

運転スキル レベル	評価数	評価結果
Expert	4	2WS << 4WS
Advanced	59	2WS < 4WS
Intermediate	29	2WS < 4WS
Beginner	17	2WS > 4WS

5. 運転し易さの解析

5.1 ドライバー視線の計測

初級者と上級者に対して、それぞれの評価結果の要因を解析するため、図17に示すアイカメラに6軸センサーを装着し、ドライバーの見ている景色と視線、頭部の運動も同時に測定した。表2にアイカメラの仕様を示す。車両に対する視線と頭部の回転角度演算ブロックを

図18に示す。

表2 アイカメラ仕様

Item	Specification
Eye Camera Sampling rate	200Hz
Data recording Sampling rate	120Hz
View Camera Sampling rate	30Hz
Resolution	1280*720



図17 頭部／視線挙動計測システム(著者使用)

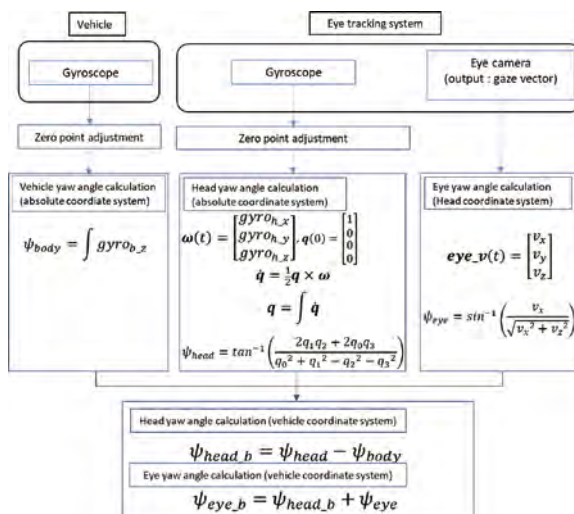


図18 視線角度の算出処理

5.2 初級者と上級者の視線の違い

アイカメラを装着し、ゆるやかな複合コーナー(図19)を2WS状態、30km/hで走行した。第一コーナーは植栽がコース際まで近くにありコーナー奥まで見渡しにくい、第二コーナーでは植栽まで距離があり奥まで見渡しやすくなっている。

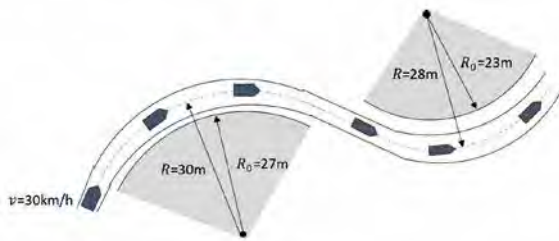


図19 複合コーナー

第二コーナーでのドライバー視点画像(図20)を示す。初級者は目線が近く、上級者は目線が遠いことが確認できる。

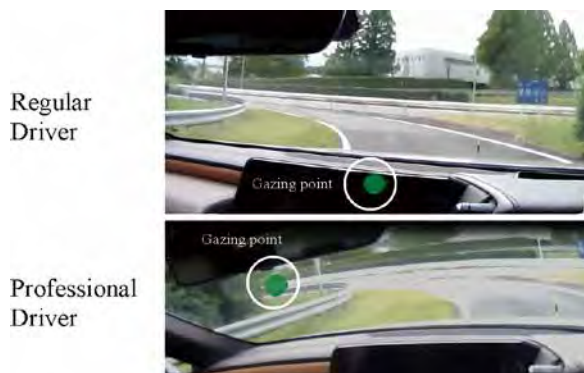


図20 第二コーナーにおける運転者カメラ映像と注視点

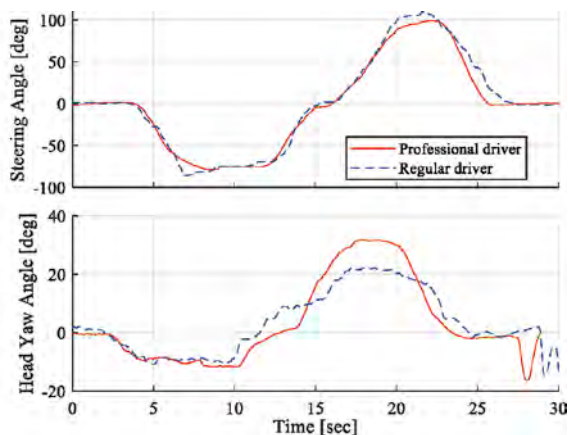


図21 複合コーナー中の頭部ヨー角(2WS)

頭部の角度を図21に示す。第一コーナーでは、植栽によって視界が制限されることで、上級者・初級者はおおよそ同じ角度となっている。第二コーナーでは、上級者は頭部を約30度傾けているのに対し、初級者は約20度と角度が小さい。

更に、上級者はコーナー進入時、操舵開始前に視線が前方にあり、旋回中の視線変動も少ないことが分かった。また路面上下入力や旋回時横G等車両の動きに対して景色の変動が小さかった。

5.3 上級者ドライバーにおける2WSと4WSの違い

複合コーナーにおいて上級者ドライバーによる2WSと4WS走行時の比較結果を示す(図22)。頭部に対する視線角度に差はないが、頭部角度が2WSより4WSで約15deg低下していることがわかる。ドライバーは β 0低減により前方を見るための頭部回転角が低減するため見やすく、運転し易いと感じていると考えられる。

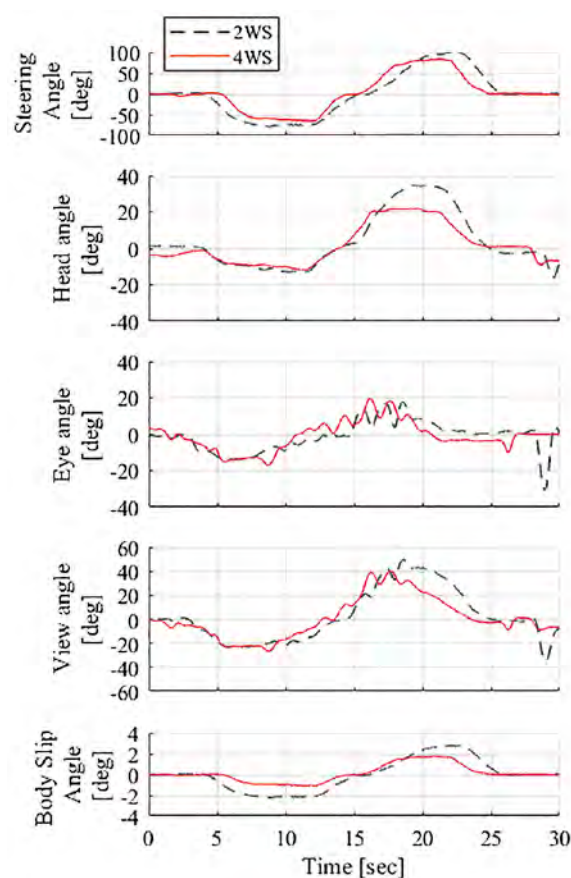


図22 上級者ドライバーの複合コーナーにおける頭部、視線ヨー角の比較(2WS,4WS)

次に90度のコーナー(図23)を2WS,4WSで走行したときの旋回中の上級者ドライバーの景色を示す(図24)。Aピラーの位置の違いから頭部回転角が4WSでは低減していることが分かる。

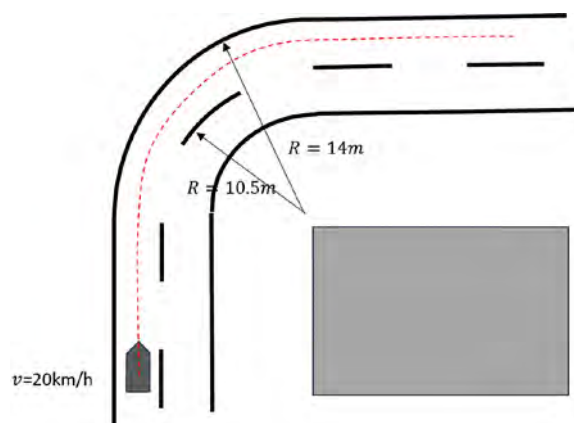


図23 右コーナー

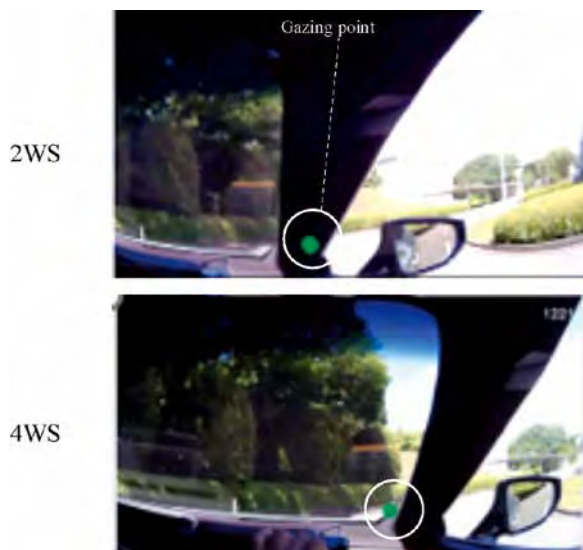


図24 上級者ドライバーの注視点と頭部カメラ映像

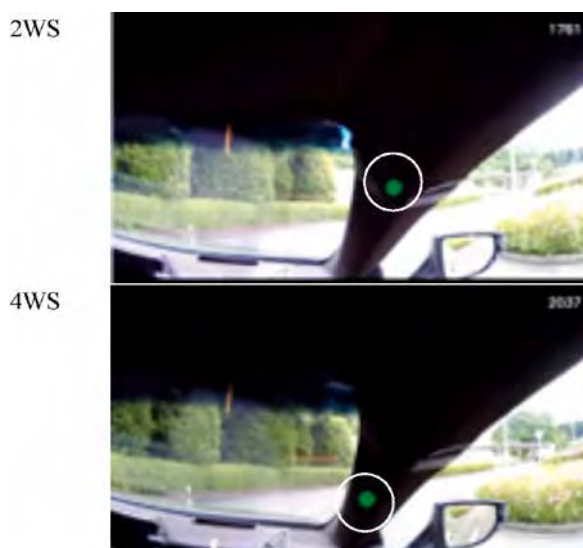


図25 初級ドライバーの注視点と頭部カメラ映像

5.4 初級ドライバーにおける2WSと4WSの違い

初級者は、視線が近く2WSと4WSで頭部回転角は変わらない(図25). そのため、車内の景色変化が小さく、車外の景色変化は大きい. すなわち、 β 0小とすることで操舵による景色変化が大きく、視覚的に運転し難いと感じていると考えられる.

5.5 ヨーレートゲインの高さによる影響解析

初級者が運転し難いと感じる要因として γ 0増加の影響を調査した. 図26に市街地路における舵角、舵角速度を評価最初と約30分の習熟走行後のデータを示す. 旋回中の修正操舵が減少し滑らかな操舵になっていることが分かる. しかし、運転のし易さの評価は変わらず2WS>4WSであったことから、 γ 0増加の影響はないと考えられる.

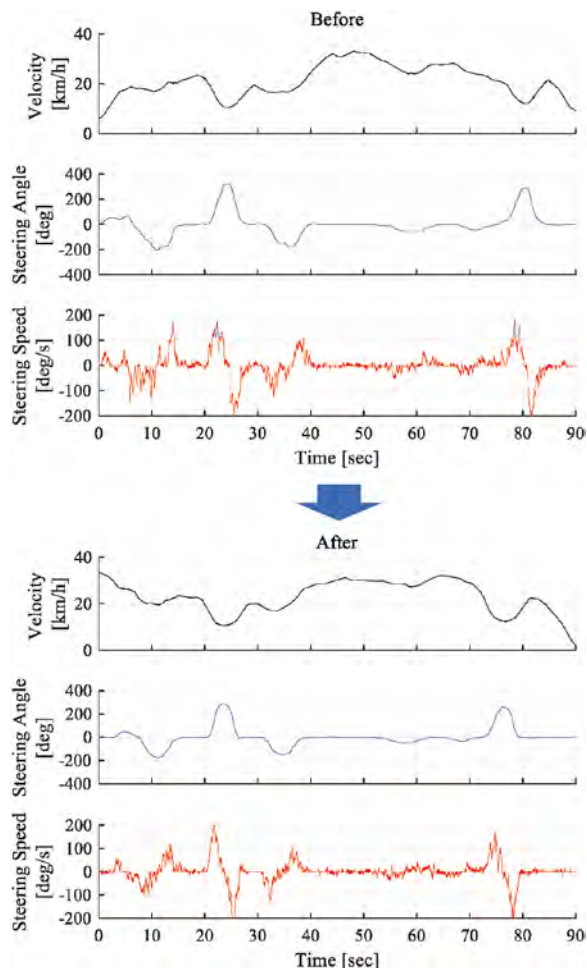


図26 初心者による運転操作

6. おわりに

従来、ヨー応答の向上を狙っていた中速域において、今回運転のし易さを狙った車体スリップ角を求め、様々なドライバーによる実験を行った.

結果、上級者と初級者では視点の遠近や安定性が異なり、運転し易さの評価が二分される事がわかった.

視点が遠く安定している上級者が運転しやすいと感じているのは、頭部回転角が低減していることが一つの要因であると考えられる. 対して視点の近い初級者が運転し難いと感じているのは、背景の変化が大きいためであると考えられる.

今後、初級者も運転し易いと感じる特性を検討する.

参考文献

- 1) 安部正人:運動のアクティブ制御と車両の運動, 自動車の運動と制御 第2版, 東京, 東京電機大学出版局, 2015, p.223-251
- 2) リンパバンテンティラワット他:ドライバ快適性と車両安定性を両立した前後輪操舵システムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.20125082, (2012)
- 3) 永井 陽平, 土屋 義明:低速時の小回り性と自然な操舵フィーリングを両立した大舵角後輪操舵 システムの開発, 自動車技術会学術講演会予稿集, No.20206326, (2020)



福川 将城

解析技術部 第1モデルベース開発室
4WSシステム開発に従事



土屋 義明

走行安全第2制御技術部
4WSシステム開発に従事



藤田 好隆

トヨタ自動車(株)
第2シャシー開発部
シャシー制御基盤強化室
車両運動統合制御開発に従事



山本 拓哉

走行安全第2制御技術部
シャシー制御開発室
4WSシステム開発に従事