

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560258

研究課題名(和文) 運転しやすい車両特性の体系化～平面運動モードと運転しやすさの関係について～

研究課題名(英文) Systematical investigations on the vehicle dynamic characteristic for easy driving
-On the relationship between sideslip motion and drivability -

研究代表者

毛利 宏 (Mouri, Hiroshi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50585552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：「車体横滑り角の小さい車は運転しやすい」ことや、車体横滑り角の発生状況でドライバの操舵パターンが変わることは古くから経験的に知られていた。しかし、その理由は全く明らかにされてこなかった。

ドライバは車両の向き(ヨー角)は検知できるが、車両の進行方向(進路角)を正確に認識することはできない、つまり車体スリップ角を正確に認識できないことを世界で初めて明らかにした。その結果、これまで経験的に言われてきたことの定量的な理由づけが可能となった。本知見に基づけば、車両の将来軌跡の道路への描画や、車体スリップ角の検知しやすいボディ形状開発などにより、「運転しやすい車」を意図して設計することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we examined the driver's steering operation which was affected with vehicle side slip angle in lane changing. We conducted experiments with driving simulator, and observed steering operation of the subjects. From the experiments, we revealed that vehicle side slip angle cause driver's unnecessary steering input, and the vehicle is moved unsteadily with this input. Driver cannot recognize the direction of travelling correctly. And it is difficult to control two state variables, i.e. yaw rate and vehicle side slip angle, by one steering angle input simultaneously. Therefore, the vehicle without vehicle side slip angle generation can make driver operate properly.

研究分野：自動車工学

キーワード：交通機械制御 車両運動性能 Vehicle Dynamics 人間-機械系

1. 研究開始当初の背景

人間-車両系において車両から人間にフィードバックされる状態量のゲインと位相が、その系の性能を大きく左右することは古くから知られていた。系の性能とは、運転のしやすさ、正確さであり、安全性に直結するものである。研究代表者らは、剛体としての車両の「動き方」も運転しやすさに影響すると考え、「動き方」に影響を与える要因として車体横滑り角に着目した。そこで車体横滑り角=0となる点をZSP(Zero Side-slip Point)と名づけた。予備実験においてヨーレイトの特性を一定に保ち、ZSPの位置だけを変更した車において、同じ車線変更コースを通過したところ、ドライバ操舵が大きく異なることを確認した。これまでの経験上、運転しやすさにこれほど大きな影響を与える指標は少なく、ZSPの前後位置と運転しやすさの関係を明らかにし、具体的な目標特性を提案する必要があった。

2. 研究の目的

車体横滑り角の小さい車は運転しやすいことは、経験的に古くから知られている。しかしそのメカニズムや理由は未だに明確に説明されていない。毛利らは車両重心点の動特性だけでなく、車体の動き方も運転しやすさに影響を与えることに注目した。まず車体横滑り角の特性のみを変更して、ドライバのハンドル操作の変化を詳細に調査し、従来の知見を確認する。その後車体横滑り角を小さく保つことが運転しやすさにつながるメカニズムを明らかにし、車両設計に活用することを目的とした。

3. 研究の方法

車体横滑り角の影響を観察するため、車体横滑り角をヨーレイトに比例して発生するものとした。具体的には図1のように、横滑り速度が常時0になる点を設定し、ヨーレイト γ は車両二輪モデルで計算し、車体横滑り角 β は式(1)で求めた。 l_z は重心点から横滑り速度 $\beta=0$ の点までの距離であり、後方を正とした。

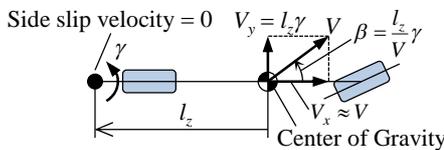


Fig.1 Two wheel vehicle model with l_z

横加速度 α は式(1)で得られた車体横滑り角 β を用いて式(2)で計算され、車両の横位置 y_c は式(2)の二階積分から表される。

$$\beta = (l_z / V) \gamma \quad (1)$$

$$\alpha = V(\gamma + \dot{\beta}) \quad (2)$$

操舵角 θ に対するヨーレイト γ と車体横滑り角 β の関係を図2に示す。 $G_{\gamma\theta}(s)$ は操舵角 θ に対するヨーレイト γ の伝達関数であり、図1の車両二輪モデルから計算される。実験には

l_z が-5m, 0m, +5mの3種類の仕様を用意した。それぞれはヨーレイト γ に対して車体横滑り角 β が同方向に発生する仕様、車体横滑り角が発生しない仕様、逆方向に発生する仕様に相当する。

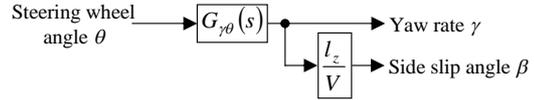


Fig.2 Block diagram of yaw rate and side slip angle

図3に正弦波状操舵角を入力した際の車線変更シミュレーションの時系列応答を示す。前述のようにヨーレイト γ は全仕様で一致している。横加速度 α が式(2)によって計算されるため、横位置 y_c は仕様ごとに差はあるものの、同じ操舵角入力に対して、いずれも蛇行することなく車線変更が可能である。この3仕様を用いて車体横滑り角 β がドライバのハンドル操作に与える影響を調べる。

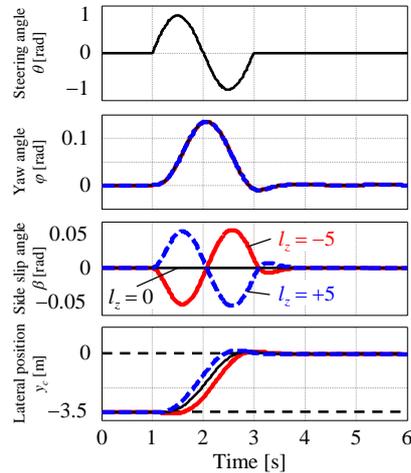


Fig.3 Time histories (simulation)

実験は簡易ドライビングシミュレータを用いた。被験者は20代前半の日常的に運転を行う男性4名とし、各仕様を8回ずつ運転した。車速は100km/hに維持され、被験者はハンドル操作のみを行った。実験コースは2車線道路とし、左車線中央に目標ライン(横位置0m)を表示した。目標ライン走行中に車両の横位置だけを瞬時に変更する外乱を加えて、目標ラインへの復帰操作を観察した。なお、被験者実験は書面などを用いて十分なインフォームド・コンセントを得て実施した。

4. 研究成果

(1) 代表的な時系列データ

図4に各仕様の代表的な結果を示す。被験者実験においても、車体横滑り角 β が発生しない $l_z=0$ の仕様では正弦波状の操舵をして、蛇行せずに車線変更できている。しかし車体横滑り角 β が発生する $l_z=-5, +5$ の仕様では正弦波状の操舵角入力ができず、蛇行が発生している。

$l_z=-5$ の車両はX部に示すように目標ラインを通り過ぎるのに対し、 $l_z=+5$ ではY部の

ように目標ライン手前で一旦収束するという違いがある。

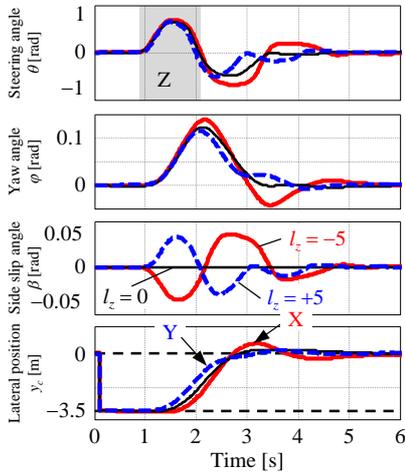


Fig.4 Time histories (experiment)

(2) 蛇行の原因となるハンドル操作を観察

被験者のハンドル操作に着目し、車線変更を5つの区間に分けた各仕様の時系列データを図5, 6, 7に示す。

区間A: フィードフォワード的にヨー角 ϕ を発生させる操作

図4最上図中のZ部において、どの仕様でもほぼ同じハンドル操作となった。この区間では車両挙動のフィードバックではなく、目標ラインからの初期偏差の視覚情報に基づいてフィードフォワード的に操作していると考えられる。

区間B: 横位置 y_c とヨー角 ϕ を同時に収束させる操作

図5中の区間Aで車両が目標ラインに向かった後に、ドライバーは目標ラインまでの横偏差 y_c とヨー角 ϕ を収束させるべく、ハンドルを切り戻す。その時の操舵角 θ のピークまでを区間Bとする。

区間C: 横位置 y_c だけを目標ラインに一致させる操作

図5に示す $l_z = -5$ では、横加速度 α が思いのほか大きく発生し、横位置 y_c は目標ラインを通り過ぎてオーバーシュートする(部)。一方図7の $l_z = +5$ では、十分な横加速度 α が得られず、目標ラインよりも手前で一旦収束する(部)。横偏差が0mになるまでを区間Cとする。

区間D: 車両を目標ラインと平行にする操作

区間Cの終端で車両が目標ライン上にあるとき、ヨー角 ϕ が $l_z = -5$ では右向きに(図5)、 $l_z = +5$ では左向きに(図7)発生している。それらのヨー角 ϕ を目標ラインと平行にするまでの操作を区間Dとする。

区間E: 横位置 y_c とヨー角 ϕ を微調整しながら収束させる操作

図5, 7において、区間Dの終端では横偏差もかなり小さくなっている。この状態から横位置 y_c とヨー角 ϕ の双方を微調整しながら目標ラインに収束させる区間を区間Eとする。

以下では蛇行の原因がどの区間に存在するか考察する。

$l_z = -5$ の場合(図5)

図5に示す区間Cの始点において、ハンドルを切り戻し始める時点で、車両は目標ラインに十分近づいている。そのときヨー角 ϕ は目標ラインに向いているが、ドライバーは目標ラインを横切ってしまうにもかかわらずハンドルを中立位置に戻すことを怠っている。これ以降ドライバーにできることは、ヨー角 ϕ を目標ラインに平行にして、横位置 y_c のオーバーシュートを小さくする方向にハンドルを大きく操作し続けることである。その結果、区間Cの終端で横位置 y_c が0になったときには、今度はヨー角 ϕ が目標ラインから遠ざかる方向に発生し、目標ラインを横切ってしまう。つまり、区間Bにおいて、既にその後の蛇行の発生が決まってしまう。

$l_z = 0$ の場合(図6)

図6に示すように、横位置 y_c を目標ラインに合わせたときにヨー角 ϕ も収束するため、C, Dは同一区間となる。これは横偏差を0にさせるためにハンドルを操作すると、ヨー

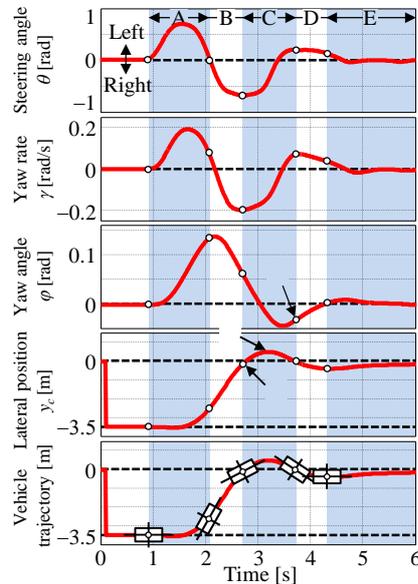


Fig.5 Time histories divided into 5 sections ($l_z = -5$)

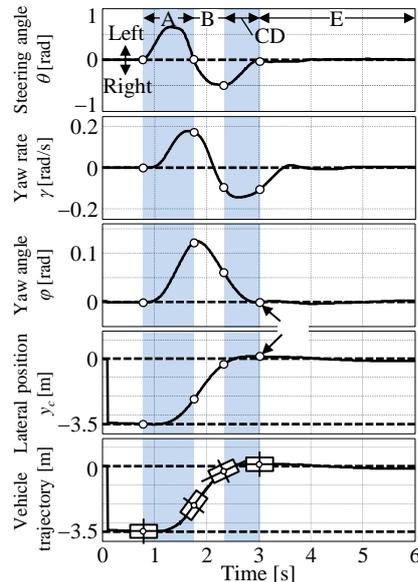


Fig.6 Time histories divided into 5 sections ($l_z = 0$)

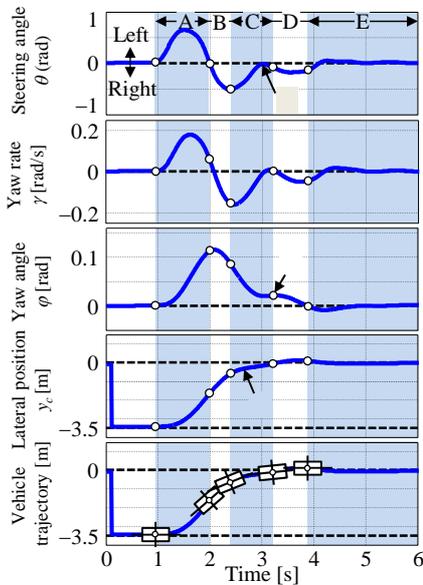


Fig.7 Time histories divided into 5 sections ($l_z=+5$)

角 φ も自動的に0になるためである．結果として蛇行することがない．

$l_z=+5$ の場合(図7)

図7において，ドライバはハンドルを中立位置に戻しながらヨー角 φ を減少させ，車両を徐々に目標ラインへ近づける．でハンドルが中立位置に戻り，横位置 y_c も目標ラインにほぼ一致するのだが，ヨー角 φ がまだ目標ラインに向かったままである．その結果目標ラインを横切ってしまう，区間Dで改めてヨー角 φ を修正することになる．つまり $l_z=-5$ と同様，区間Bが原因で蛇行が発生する．

以上より車体横滑り角 β を伴う車両で蛇行が発生する場合は，いずれも横位置 y_c とヨー角 φ を同時に収束できていないことが原因であることが明らかになった．

図8に横位置 y_c とヨー角 φ の関係を示す．図の第1象限は車両が左方向を向いた状態で目標ラインより左側にいることを示し，第3象限はその逆である．つまり第1,3象限からは目標ラインへ到達することはできない． $l_z=-5$ では，X部のようにヨー角 φ が残った状態で目標ラインを通り過ぎ，車両の状態が第1象限に入る．ここから目標ラインへ到達することはできず，車両の向きを右へ向けて第4象限へ入る．しかし，またヨー角 φ が残った状態で目標ラインへ到達してしまい，第3象限へ入る．というように，車両が蛇行している様子がわかる． $l_z=0$ は第2象限内だけで目標ラインへ到達できている． $l_z=+5$ ではY部に示すように，横偏差が残ったままヨー角 φ が収束するように見える．まだ第2象限内なので，適切なハンドル操作を行えば目標ラインへ到達可能である．しかしヨー角 φ を残したまま目標ラインへ到達し，第1象限に入り，これ以降は修正操舵を行って，結果として蛇行する．

上述のように，車線変更タスクでは横位置 y_c とヨー角 φ を目標ラインと一致させる必要

がある．車体横滑り角 β が発生しない場合，ハンドルでヨーレート $\dot{\gamma}$ を制御するだけでよい．しかし車体横滑り角 β が発生する場合は，ハンドルでヨーレート $\dot{\gamma}$ と車体横滑り角 β を同時に制御しなければならない．つまり，操舵角入力1つでヨーレート $\dot{\gamma}$ と車体横滑り角 β の2つの状態変数を同時に制御する必要があるが，車体横滑り角 β の影響を正確に予測することができないために不適切なハンドル操作が行われると考えられる．

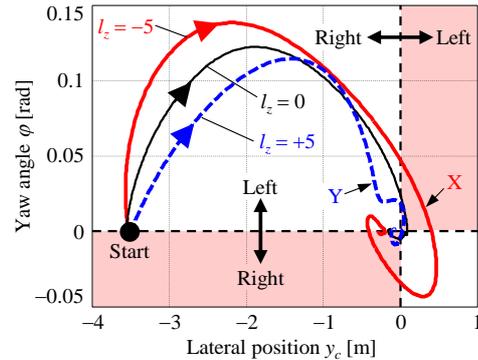


Fig.8 Relation between lateral position y_c and yaw angle φ

(3)前方二次予測モデルを用いた考察

ドライバが車体横滑り角 β を正確に検出できないこと確認するために，前方二次予測モデルを用意した．式(3)は車体横滑り角 β を考慮しない二次予測モデルで，ヨーレートの二次予測 $y_{p\gamma}$ と呼ぶ．一方，式(4)は車体横滑り角 β を考慮するモデルで，進路角速度の二次予測 $y_{p\gamma\beta}$ と呼ぶ．

$$y_{p\gamma} = y_c + V\varphi T_p + \frac{1}{2}V\dot{\gamma}T_p^2 \quad (3)$$

$$y_{p\gamma\beta} = y_c + V(\varphi + \beta)T_p + \frac{1}{2}V(\dot{\gamma} + \dot{\beta})T_p^2 \quad (4)$$

$y_{p\gamma}, y_{p\gamma\beta}$: 予測横位置[m], T_p : 前方予測時間[s]

蛇行の原因となった区間Bについて，上記2種類の二次予測値を3ヶ所(P1,P2,P3)で求めた．P1は区間Bの始点，P3は区間Bの終端でP2はその中間で特徴的な点である．それぞれの結果を図9,10,11に示す．

$l_z=-5$ の場合(図9)

P1で両二次予測とも目標ラインに向かうと予測している．P2からP3において，ヨーレートの二次予測 $y_{p\gamma}$ はX部で目標ラインと接するように収束できると予測している．しかしこの予測値を信用してハンドルを操作すると，実際にはX部のように進路角速度の二次予測 $y_{p\gamma\beta}$ が示す軌跡となり目標ラインを通り過ぎて，オーバーシュートしてしまう．

$l_z=0$ の場合(図9)

車体横滑り角 β が発生しないため，2種類の二次予測値は一致する．したがって，二次予測値が目標ラインに接するP3でハンドルを中立位置に戻し始め，そのまま区間Cに入ることによって横位置 y_c とヨー角 φ を同時に収束させ

ることができる。

$l_z=+5$ の場合(図 10)

P1 において、ヨーレイトの二次予測 y_{py} は目標ラインに向かう軌跡を示すが、進路角速度の二次予測 $y_{py\beta}$ は目標ラインから遠ざかる予測をしている。P2 の時点でヨーレイトの二次予測 y_{py} は目標ラインを通り過ぎると予測しているが、実際には目標ライン手前で収束することが進路角速度の二次予測 $y_{py\beta}$ からわかる。この状態から P3 に移り、ヨーレイトの二次予測 y_{py} は Y 部で目標ラインに接し、そのまま収束できると予測している。しかし実際の軌跡は P2 と同様に目標ラインへ到達せず収束することが進路角速度の二次予測 $y_{py\beta}$ からわかる。

上述した傾向は図 4~7 に示した実験結果にも現れており、ドライバはヨーレイト γ (あるいはヨー角 ϕ) に基づいてハンドルを操作していると考えられる。

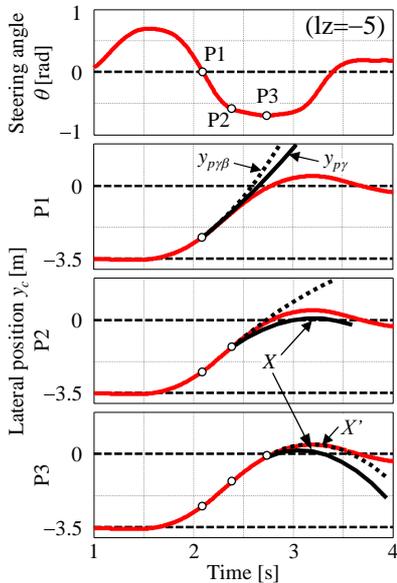


Fig.9 Time histories with second order prediction

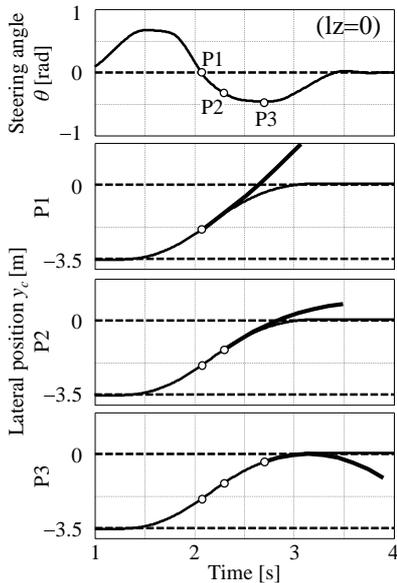


Fig.10 Time histories with second order prediction

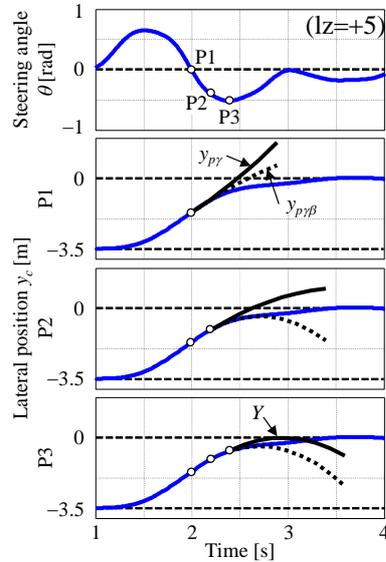


Fig.11 Time histories with second order prediction

(4) 将来軌跡のガイドライン表示実験

図 12 のように二次予測のガイドラインを点列で表示し、車線変更実験を行った。被験者には図 12A 部のように、目標ラインにガイドラインが接する操作を指示した。

図 13 に結果を示す。将来の軌跡の明示により、全仕様において蛇行なく目標ラインへ収束が可能になった。

上記結果から、以下のことを明らかにした。

- (1) ドライバは車両の向き(ヨー角)は認識できるが、進行方向(進路角)を正確に認識できない、つまり車体横滑り角を正確に認識できないことを世界で初めて明らかにした
- (2) そのため、横滑り角が負に発生する(リアを振り出す)車両では、目標ラインに収束する操舵が遅れ、軌跡のオーバーシュートにつながる。
- (3) 横滑り角が正に発生する(横移動感の強い)車両では目標ライン到達前に横移動を止める操舵を行い、車線変更時のハンドル操作が一周期増加してしまう。
- (4) 「横滑り角の小さい車は運転しやすい」という経験則の理由は、人間の苦手な横滑り角検出を不要とするためである。
- (5) 車両の将来軌跡の道路へのレーザでの描画や、ボディ形状の工夫などにより、「運転しやすい車」を意図して設計することが可能になる。

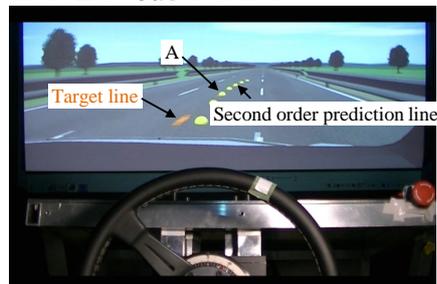


Fig.12 Indication of second order prediction

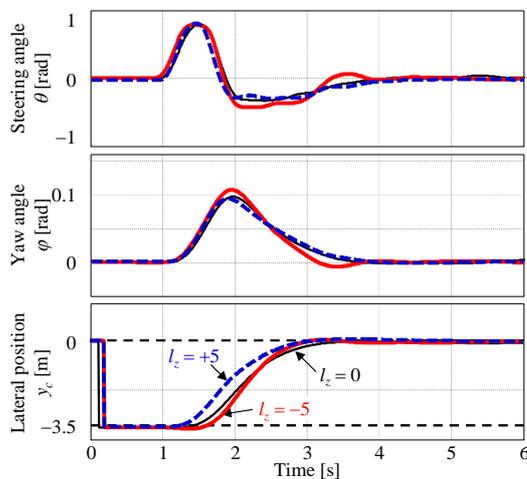


Fig.13 Time histories indicated $y_{p/\beta}$'s guide line

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

[雑誌論文](計3件)

鈴木雄太, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 菅沢深, 車体横すべり角が操舵に与える影響について, 機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.815, 2014, TL0217

DOI: 10.1299/transjsme.2014tl0217

古性裕之, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 複数の前方注視点を用いた車線追従制御側の提案, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol.45, No.2, 2014, pp.315-321

<http://www.bookpark.ne.jp/cm/jsae/select.asp?pageno=21&pagenum=10&category=104&lang=&table=JSAP>

永井惇也, 孕石泰丈, 塩澤裕樹, 毛利宏, 非線形カルマンフィルタを用いた車体スリップ角の推定, 機械学会論文集C編, 査読有, Vol.79, No.806, 2013, pp.3358-3367
https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rikaic/79/806/_contents/-char/ja/

[学会発表](計9件)

K.Kazama, Y.Suzuki, Y.Haramiishi, H.Mouri, F.Sugasawa, An Experimental Analysis of Driver's Steering Operation Affected with VehicleSide Slip Angle, 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'14), 2014年9月22日, 東京農工大学

鈴木雄太, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 菅沢深, 車体横すべり角発生にともなうドライバの操舵挙動変化, 自動車技術会2014年度春季学術講演会, 2014年5月22日, パシフィコ横浜

鈴木雄太, 孕石泰丈, 毛利宏, 菅沢深, 車体横すべり角と車線変更しやすさの関係について, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会, 2014年3月15日, 東京農工大学

初山拓三, 毛利宏, 鈴木雄太, 孕石泰丈, 日本機械学会関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, 2014年3月14日, 東京農工大学

鈴木雄太, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 車体横すべり角の特性が操舵に与える影響について, 日本機械学会第22回交通・物流部門大会 TRANSLOG2013, 2013年12月10日, 東京大学生産技術研究所

鈴木雄太, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 車体横すべり角が操舵に与える影響について, 山梨講演会2013, 2013年10月26日, 山梨大学

鈴木雄太, 保坂雅弘, 風間恵介, 孕石泰丈, 毛利宏, 車体姿勢角がドライバの操舵に及ぼす影響について, 自動車技術会2013年度春季学術講演会, 2013年5月24日, パシフィコ横浜

鈴木雄太, 保坂雅弘, 孕石泰丈, 毛利宏, 車体スリップ角の特性がドライバの操舵に及ぼす影響について, 自動車技術会関東支部2012年度学術研究講演会, 2013年3月8日, 明治大学生田キャンパス

永井惇也, 塩澤裕樹, 孕石泰丈, 毛利宏, 拡張カルマンフィルタを用いた車体スリップ角の推定, 日本機械学会第21回交通・物流部門大会 TRANSLOG2012, 2012年12月5日, 東京大学生産技術研究所

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称: 車体横すべり角推定装置

発明者: 塩澤裕樹, 鈴木達也, 毛利宏, 孕石泰丈

権利者: 塩澤裕樹, 鈴木達也, 毛利宏, 孕石泰丈

種類: 特許

番号: 特願2012-264363

出願年月日: 2012年12月3日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

毛利 宏 (MOURI, Hiroshi)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 50585552

(2) 研究分担者

孕石 泰丈 (HARAMIISHI, Yasutake)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号: 10402489

菅沢 深 (SUGASAWA, Fukashi)

玉川大学・工学部・教授

研究者番号: 80297100