

自動運転車のための縦横方向ダイナミクスの モデルフリー制御

Model-Free Control of Longitudinal and Lateral Dynamics for Automated Vehicles



ブリジット・D'アンドレア・ノベル*
Prof. Brigitte d'Andréa-Novel

The development of “Advance Driver Assistance Systems” (ADAS) will intensify in the future and contribute to the deployment of Intelligent Transportation Systems (ITS), thus improving the safety and fluidity of traffic, as well as energy consumption. For that purpose, a new “Model-Free Control” approach (MFC) is presented in the context of longitudinal and lateral motion of a car, leading to “intelligent controllers”, easy to implement. Simulation results, obtained on realistic environments, have shown the efficiency of our approach.

Key Words: Automotive control, Longitudinal and lateral control, model-free control, algebraic estimation, ADAS (Advanced Driving Assistance Systems)

1. はじめに

現在、地球は以下に示す四つの大きな問題に直面している。

- ・エネルギー：一世紀も満たないうちに、人類は地球の化石資源をほとんど使い果たした。
- ・環境汚染：地球上では約 10 億台の自動車が走行しており、そのうち 60% は、北米・欧州・アジア（世界人口の 15% 相当）において使用されている。自動車は温室効果ガスを排出し、結果として、地球温暖化を引き起す。
- ・安全保障：2015 年の WHO のデータに基づくと、年間約 130 万人が交通事故により亡くなっており、そのうち 10% は経済的に豊かな国の人である。さらに、事故の 95% は、運転者のミスに起因したものである。
- ・交通渋滞：道路の需要と供給が一致していないため、道路の使用法の改善と規制が必要である。

したがって、人々の関心は自動走行車、より一般的に言うところ、「高度道路交通システム (Intelligent Transport System : ITS)」の新しい技術を開発することにある¹⁾。

欧州では、1985 年に Eureka PROMETHEUS 計画 (ユリーカ・プロメテウス = Programme for European

Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety : 最高の効率と空前の安全性を備えた欧州交通計画) が始まり、1994 年にパリで初めての ITS 会議が行われた。現在では、この国際的な会議は毎年世界中のさまざまな国で開催され、欧州だけではなくアメリカ合衆国 (カリフォルニア州における PATH 計画)、日本、韓国および 2014 年に自動車製造台数が 2 000 万台を超えた中国においても実施されている。

さらに、新しい位置推定技術 (全地球測位システム)、ナビゲーション技術 (地理情報システム、デジタルマッピングシステム)、固有受容センサ (加速度計、ジャイロメータ、走行距離計など)、外受容センサ (埋め込み型カメラ、レーダ、レーザなど) が開発されたことで、自動走行車と ITS の実現が可能になった。

そして自動車メーカーは、運転者を補助し、安全性・快適性・効率・エネルギー消費を向上させるために、さまざまな高度運転支援システム (Advance Driver Assistance System : ADAS) を開発した。多くの研究が自動車事故や燃料消費¹⁾に対する ADAS の有用性を示している。

研究例として、エアバッグやシートベルトなどの衝突安全装置 (passive) や、アンチロック・ブレーキ・システム (Antilock Brake System : ABS) や横滑り防

*パリ国立高等鉱業学校ロボティクス研究所 (CAOR)

止プログラム (Electric Stability Program : ESP) などの予防安全装置 (active) が挙げられる。両者とも、これまで多くの衝突を防止しており¹⁶⁾、現在は新しい車両すべてに搭載することが義務付けられている¹⁴⁾。その他の passive または active である ADAS オプションを以下に挙げる。

- ・ 障害物衝突警報システム：障害物を検出し、差し迫った衝突について運転者に警告をする (passive)。
- ・ 同一車線維持システム：意図せず車両が車線から逸脱した際に運転者に警告をする (passive)。
- ・ 緊急ブレーキシステム：障害物を検出し、運転者に差し迫った衝突について知らせる (passive)。もし衝突が避けられないようであれば、システムが自動的にブレーキをかける (active、ただし、運転状況による)。
- ・ エコ運転支援システム：より環境にやさしい方法で運転を続けるために、最適な速度と適切なギヤの選択を運転者に提供し、燃料消費を減らす (passive)。
- ・ 縦方向制御システム：外部受容センサと固有受容センサを使用してアクセルまたはブレーキペダルを制御し、車両の速度と前方車両との車間距離を調整する (active)。
- ・ 横方向制御システム：外部受容センサと固有受容センサを使用してステアリングホイールを制御し、車線内に車両を維持する。また、前方車両を追い越す際に安全に車線変更をする (active)。

本報では、縦方向および横方向制御システム二つの ADAS に焦点を当てる。その理由として、縦方向と横方向の制御は、安全性・交通量・快適性・燃料消費量を改善し、安全確保に必要な車間距離を短くできるからである。これにより、交通の流れが改善されその分交通量を増やすことができる。車両の縦方向と横方向の制御に関する問題は、種々の論文の中でモデルベース技術を中心に広範囲に調査されてきた^{1), 2), 4), 6), 12), 17), 20), 23), 24)}。モデルベース技術によるアプローチは適用するモデルのキャリブレーションに依存することは明らかである。モデルが妥当であれば制御性能が保証されるものの、モデルの妥当性自体を保証することは難しい。これこそが、著者らがモデルフリー制御手法を開発し続けてきた理由であり、実機への組み込みという観点で容易に実装可能な制御アルゴリズムにつながる。

第2章では、縦方向と横方向の車両制御問題に対する開発の進展について、まずは非線形3自由度 (Degree

of freedom : DoF) モデルに基づいて示す。第3章では、モデルフリー制御手法の概略を示し、第4章では、その制御手法を縦横方向の車両制御の設計へ応用する方法を示す。最後に、第5章で、シミュレーションの結果と結論を示す。

2. 縦方向と横方向のモデルベース制御における過去の開発

縦方向と横方向のダイナミクスを含めた軌跡追従について、以下の式(1)にて簡易的に示される非線形3自由度車両モデルを用いて検討した。

$$\begin{cases} m(\dot{V}_x - \dot{\psi}V_y) = F_{xf} + F_{xr} \\ m(\dot{V}_y + \dot{\psi}V_x) = F_{yf} + F_{yr} \\ I_z\ddot{\psi} = L_fF_{yf} - L_rF_{yr} \end{cases} \quad (1)$$

- ・ m : 車両質量
- ・ V_x : 縦方向の車両速度, V_y : 横方向の車両速度
- ・ $\dot{\psi}$: ヨーレート
- ・ I_z : ヨー慣性モーメント
- ・ F_{xf} , F_{xr} : 縦方向への前後のタイヤ力
- ・ F_{yf} , F_{yr} : 横方向への前後のタイヤ力
- ・ L_f , L_r : 車両の重心から前軸および後軸までの距離
前後の縦方向の力は、ホイールの回転運動を用いて表すことができる。

$$\begin{cases} F_{xf} = \left[\frac{1}{R} \right] (-I_r\dot{\omega}_f + T_e - T_{bf}) \\ F_{xr} = \left[\frac{1}{R} \right] (-I_r\dot{\omega}_r - T_{br}) \end{cases} \quad (2)$$

- ・ R : ホイールの半径
- ・ I_r : ホイールの慣性モーメント
- ・ ω_f , ω_r : 前後のホイールの回転角速度
- ・ T_e : エンジントルク
- ・ T_{bf} , T_{br} : 前後の制動トルク
をそれぞれ示している。

すべり角が小さい領域を前提とすると、線形な横方向のタイヤ力モデルは、以下のように表される。

$$\begin{cases} F_{yf} = C_f \left[\delta - \frac{V_y + \dot{\psi}L_f}{V_x} \right] \\ F_{yr} = -C_r \left[\frac{V_y - \dot{\psi}L_r}{V_x} \right] \end{cases} \quad (3)$$

・ C_f, C_r : 前後タイヤのコーナリング剛性係数

・ δ : ステアリング角

をそれぞれ示している。

車両モデル(1)~(3)は, Differentially Flat であることが示されている²⁰⁾。この特性により, 軌跡追従誤差を指数関数的にゼロに収束させる非線形制御器の設計が可能となる²⁰⁾ (注記 9) 「differential flatness property」参照)。

しかし, この制御方法は, 非線形性が強く推定が難しいタイヤのロードフォースなど, パラメータの不確定要因に対し十分に対応できるものではない。このことは, 実際のテストトラックにおいて, 実験的にブレーキを操作した際のタイヤの特徴を示した図 1 よりわかる。このブレーキ操作は, この走行状況で異なる非線形なタイヤ力を線形なタイヤモデルにより表すことができないことを示している。また, コーナリング剛性係数は車両の縦方向の速度に依存していることも明らかとなった。さらに, たとえば高い値の荷重伝達比 (load transfer ratio: LTR) による転覆現象や, 旋回時にブレーキをかけた際, 前後の横滑り角が大きくなることにより起こるアンダーステアやオーバーステアに対して, 簡略化された車両モデルでは, 効率的なモデルベース制御器を設計するための実際の車両の現実的な動きを再現できない。このような理由から, 著者らは均一な出力を利用^{3), 19)} した「モデルフリー設定⁷⁾」に基づく車両制御装置を開発した。得られた数値演算結果の良好さにもかかわらず, この解決策には二つの均一な出力のうち一つが, 車両の質量など, 特定が難しく不確かな物理的パラメータに依存しているという課題があった。これは, 特に動的な高い負荷が加わる急な旋回によって軌跡が特徴付けられる際に, 軌跡への正確な追跡が保証されないことを示唆している。よって, 一般的な走行状態において「良い数学モデル」を得ることは不可能ではないにしても, 非常に難しい。このことから, 車両上の測定で容易に演算可能な二つの「自然出力」(車両の縦方向の速度, 横方向の偏差)を用いる「モデルフリー制御手法」を適用することとした。車両の縦方向と横方向の制御への「知的制御装置」の適用を実現する設計を紹介する前に, まず一般的な「モデルフリー制御手法」を示す。

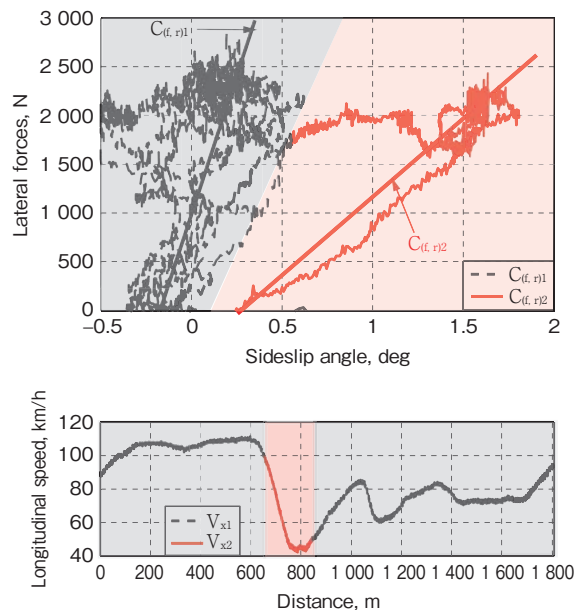


図 1 実験的な横方向タイヤ力特性における非線形挙動
Nonlinear behavior of experimental lateral tire force characteristics

3. モデルフリー制御手法の背景

モデルフリー制御 (Model-Free Control: MFC) はすでにさまざまな実例に適用・利用され, 多くの成功を収めている^{7), 8), 10), 15)}。ここでは ITS への適用について述べる^{5), 20), 24)}。

入力と出力の関係は, 以下のような短い時間刻みによって表すことができる。 z は出力変数, u は入力変数を示す。

$$z^{(\nu)} = F + \alpha u \tag{4}$$

α, ν は選択される定数であり,

- ・ ν は時間微分の次数
- ・ αu と F は同じ次数

著者らの知るかぎりでは, これまでの MFC に関する具体例においては, すべて $\nu=1, 2$ であった。

F について下記のように仮定をすることができる。

- ・ F は制御入力 u と制御出力 z の測定値によって推定できる。
- ・ F はシステムの未知モデル部分と摂動・不確定部分の区別ができない。

$\nu = 2$ を式(4)に代入すると, 以下のようになる。

$$\ddot{z} = F + \alpha u \tag{5}$$

対応する知的PID制御器（またはi-PID）は以下のように示される。

$$u = -\frac{(F - \ddot{z}^d + K_p e + K_I \int e dt + K_D \dot{e})}{\alpha} \quad (6)$$

- ・ z^d : 目標信号
- ・ $e = z - z^d$: 追従誤差
- ・ K_p, K_d, K_i : 通常のPIDゲイン

F 項が補償されるので、式(6)より求められる u は i-PID 制御器（知的PID）となる。式(5), (6)を組み合わせると以下ようになる。

$$\ddot{e} + K_p e + K_I \int e dt + K_D \dot{e} = 0 \quad (7)$$

もし $K_i=0$ であれば、知的PD（またはi-PD）を求めることができる。

ここで、仮に式(4)に $\nu = 1$ を代入すると、以下のようになる。

$$\dot{z} = F + \alpha u \quad (8)$$

そして、 $K_i = 0$ を代入すると、今まででもっとも有効な知的比例制御器（またはi-P）を求めることができる。

$$u = -\frac{(F - \dot{z}^d + K_p e)}{\alpha} \quad (9)$$

さらに式(8), (9)を組み合わせると以下のようになる。

$$K_p e + \dot{e} = 0 \quad (10)$$

式(7)にあるように、追従誤差は指数関数的にゼロに収束する。i-PD 制御器を表す式(7)やi-P 制御器を表す式(9)における F 項は補償されるために既知である必要がある。しかし、前述したように、通常この F 項は未知のモデル化されていないダイナミクス、変動、不確定性に相当する。したがって、 F を推定する必要がある。参考文献 10), 11) で展開されている代数的パラメータ同定では、妨害的なノイズの確率的な性質を省くことができ、これによると、 F は区分的定関数 F_{est} による短い時間刻み $[t-\tau, t]$ において推定される。 F を推定するため、式(8)を使用可能な定義域で再度示す。 $Z, U, \frac{\Phi}{s}$ は、 $[t-\tau, t]$ において定数となる z, u, F のラプラス変換を表す²⁵⁾。

$$sZ = \frac{\Phi}{s} + \alpha U + z(0) \quad (11)$$

s に関しては、式(11)の両辺を左微分することによって、初期条件 $z(0)$ を消去する。これにより、以下の式が得られる。

$$Z + s \frac{dZ}{ds} = -\frac{\Phi}{s^2} + \alpha \frac{dU}{ds}$$

ノイズの軽減は式の両辺に s^{-2} を左から掛けることによって達成され、逆ラプラス交換によって時間領域の整式となる。

$$F_{est}(t) = -\frac{6}{\tau^3} \int ((\tau - 2\sigma)z(\sigma) + \alpha\sigma(\tau - \sigma)u(\sigma)) d\sigma \quad (12)$$

$\nu = 2$ の場合への拡張は簡潔であり、得られる F の推定は以下より算出できる²⁵⁾。

$$F_{est}(t) = -\frac{60}{\tau^5} \int (\tau^2 + 6\sigma^2 - 6\tau\sigma)z(\sigma) d\sigma - \frac{30\alpha}{\tau^5} \int (\tau - \sigma)^2 \sigma^2 u(\sigma) d\sigma \quad (13)$$

以降では、このMFC手法を車両制御に展開していく。

4. 縦方向と横方向のモデルフリー車両制御

前項で述べたように、MFC手法を有効利用するためには、入力と出力を適切に選択する必要がある。モデル化にかかわる問題を避け、縦横方向の動きの望ましい追従を確実なものとするために、以下の入力変数と出力変数を選択する。

- ・ 第1入力である u_1 は、加速または制動トルクであり、第1出力である y_1 は、車両の縦方向の速度 V_x である。
- ・ 第2入力である u_2 は、ステアリングホイールの角度であり、第2出力である y_2 は、車両の横方向の偏差である。（例：道路の中央に対して）

車両の横方向の偏差を表す第2出力を、 V_x, V_y, ψ ヨーレート ψ で表現できることは明らかである。このことで、縦方向と横方向の動きの連成効果を考慮することができる。モデルフリー制御設計の背景、上記の入出力、およびニュートンの第2法則に従って、以下の二つの局所モデルを定義する。

$$\text{縦方向局所モデル} : \dot{y}_1 = F_1 + \alpha_1 u_1 \quad (14)$$

$$\text{横方向局所モデル} : \dot{y}_2 = F_2 + \alpha_2 u_2 \quad (15)$$

式(14), (15)は相互に関係していないようにみえるが、縦方向と横方向の連成効果は F_1, F_2 項に含まれている。さらに、式(15)は y_2 の時間微分に関する2次の式である。これは、ニュートンの第2法則によるものである。よって、式(15)は、式(6)のi-PDを $K_i = 0, e_2 = y_2 - y_2^d$ とすることにより、閉じることができる。

$$u_2 = - \frac{(F_2 - \ddot{y}_2^d + K_p^2 e_2 + K_d^2 \dot{e}_2)}{\alpha_2} \quad (16)$$

式(14)は式(9)のi-P制御器を $e_1 = y_1 - y_1^d$ とすることにより、閉じることができる。

$$u_1 = - \frac{(F_1 - \dot{y}_1^d + K_p^1 e_1)}{\alpha_1} \quad (17)$$

式(17)の F_1 は、式(12)の $z = y_1$, $u = u_1$ を用いて求めることができる。また、式(16)の F_2 は、式(13), $z = y_2$, $u = u_2$ を用いて求めることができる。

所見として上述の展開では、入力は理想的な作動装置であるとみなされている(いかなるコマンドにも瞬時に応答するもの)。たとえば、車両では、ステアリングホイールの角度は本来、制御されていなければならない、それゆえ、有限時間で応答する。しかしこの応答時間は車両のヨー運動よりも十分に速いと想定される。一般的に、ステアリングシステムの角度制御はステアリングサプライヤによって開発される。ジェイテクトは高いロバスト性²²⁾を確保するため本報で紹介した制御手法と類似の手法に基づき、未知ダイナミクスを推定して補償する角度制御技術を開発している。

5. おわりに

技術的観点だけではなく技術的な介入およびシステムの信頼性・安全性に対する世間の認識と受容が整っていないことから、自動車にADASを組み込むことは難しいとされている。そういう意味では、実際の車両にADASを実装する前にシミュレーションをすることは妥当性検証には必要なステップである。この目的のために、相互関連したpro-SiVIC/RTMaps試作プラットフォームなどの多くのプラットフォームが開発されてきた²¹⁾。シミュレーションをすることで、実際の状況に近づくことができる。たとえば、天候要素や組み込まれたアプリケーションに使われている機能のロバスト性への物理的なパラメータの影響を調べることで、このことが可能となる。また、障害物検出や路面の摩擦異常による緊急ブレーキや道路逸脱警告のような、難しく危険な試験も簡単に行うことができる。

本研究では、図2のブロック図に従ってシミュレーションを実施した。シミュレーションでは、シミュレーションモデル用の正確な10自由度非線形車両と、車両の目標軌跡として、試作車両によってテストトラックであらかじめ記録した実際のデータを用いた。

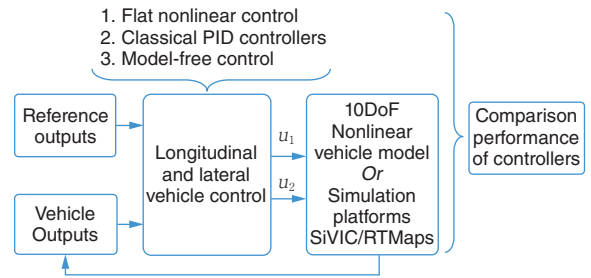


図2 車両制御装置器、目標軌跡再生器、車両モデルのブロック図

Diagram block of vehicle controllers, reference trajectory reconstruction and vehicle models

MFCの効率・妥当性・性能を、非線形フラット制御と従来のPID制御器と比較する。

2種類の路面摩擦係数に対して、2種類のシミュレーションのシナリオを作成した。一つ目は、乾燥したアスファルト $\mu = 1$ のシミュレーション、二つ目は濡れたアスファルト $\mu = 0.7$ のシミュレーションである。これらのシナリオは、地面への密着能力の減少により車両の操縦性・制御性がより難しくなる状況を想定している。

乾燥した道路での結果を図3、図4、図5、図6に示す。これらのシミュレーションは、MFCの十分申し分ない結果を示している。特に、図5は、MFCによって発生した横方向偏差とヨー角度出力における追従誤差が、他の制御装置器よりも良いことを示している。MFCの誤差は、10cm以下かつ0.5度以下である。これまで取り上げてきたテストトラックは、横方向と縦方向への高いダイナミクス性能を要求している点に注目してほしい。このテストトラックには直線部分にさまざまな曲線がつけられた構造であり、これらすべての要素によりあらゆる運転状況を想定できる。また、図6は、実際に運転者が走路に沿って走行したときの信号と制御信号が、非常に近いことを表している。

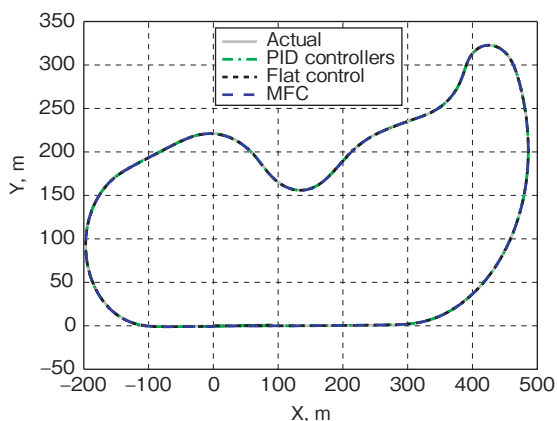


図3 目標軌跡と閉ループシミュレーションによる軌跡
The reference trajectory versus the closed-loop simulated trajectories

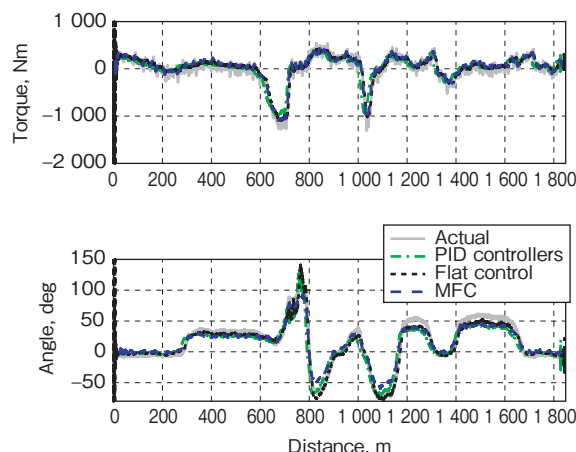


図6 ホイールトルクとステアリング角度の制御信号：実際の結果とシミュレーション結果
Wheel torques and steering angles control signals: actual and simulated

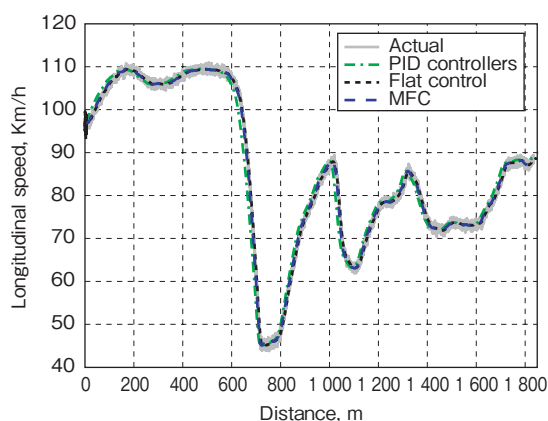


図4 実際の縦方向速度と閉ループシミュレーションによる縦方向速度
The actual longitudinal speed versus the closed-loop simulated longitudinal velocities

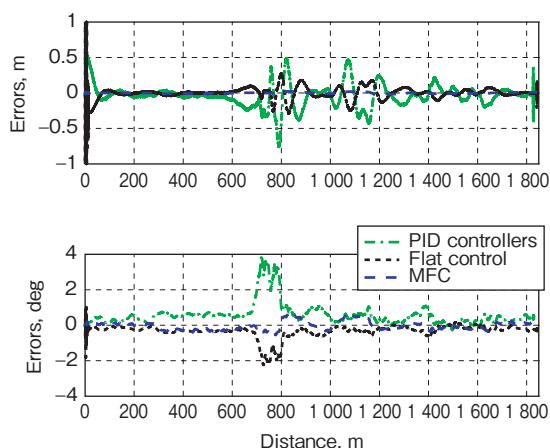


図5 横方向偏差およびヨー角度の軌跡追従誤差
Tracking trajectory errors on lateral deviation and yaw angle

さらに、濡れた路面の場合は、標準化されたすべてのエラーは予想通り悪化した。しかし、MFCを適用した場合、標準化されたエラーの最大値は3.5%以下で、他の制御器よりも良い結果となった。

結果として、過酷な運転環境であっても、この新しいMFC手法の妥当性が実証された。最終的な制御アルゴリズムは簡単に実装でき、またほとんどの車両において使用できる測定値を使用していることも示しておく。

参考文献

- 1) J. ACKERMANN, J. GULDNER, W. SIENEL, R. STEINHAUSER, V.-I. UTKIN : Linear and nonlinear controller design for robust automatic steering, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 3,(1995) 112-143.
- 2) B. d'Andréa-NOVEL, M. ELLOUZE : Tracking with stability for a vehicle braking in a corner, 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, (2001).
- 3) B. d'Andréa-NOVEL, L. MENHOUR, M. FLIESS, H. MOUNIER : Some remarks on wheeled autonomous vehicles and the evolution of their control design, Proceedings of the 9th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, IAV 2016, Leipzig, (2016).
- 4) V. CERONE, M. MILANESE, D. REGRUTO : Combined automatic lane-keeping and driver's steering through a 2-DOF control strategy, IEEE

- Transactions on Control Systems Technology, vol. 17, (2009)135-142.
- 5) S. CHOI, B. d'Andréa-Novel, M. FLIESS, H. MOUNIER, J. VILLAGRA : Model-free control of automotive engine and brake for Stop-and-Go scenario, European Control Conference, Budapest, (2009) <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00395393/en/>.
 - 6) H. CHOU, B. d'Andréa-Novel : Global vehicle control using differential braking torques and active suspension forces, Vehicle System Dynamics, vol. 43, (2005)261-284.
 - 7) M. FLIESS, C. JOIN : Model-free control, International Journal of Control, vol. 86, (2013) 2228-2252, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00828135/en>
 - 8) M. FLIESS, C. JOIN : Stability margins and model-free control: A first look, 13th European Control Conference, Strasbourg, (2014) <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00966107/en/>.
 - 9) M. FLIESS, J. LÉVINE, P. MARTIN, P. ROUCHON : Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples, International Journal of Control, vol. 61, (1995)1327-1361.
 - 10) M. FLIESS, H. SIRA-RAMÍREZ : An algebraic framework for linear identification, ESAIM COCV, vol. 9, (2003)151-168.
 - 11) M. FLIESS, H. SIRA-RAMÍREZ : Closed-loop parametric identification for continuous-time linear systems via new algebraic techniques, Identification of continuous-time models from sampled data, Springer, (2008)362-391, <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00114958/en/>.
 - 12) S. FUCHSHUMER, K. SCHLACHER, T. RITTENSCHÖBER : Nonlinear vehicle dynamics control - A flatness based approach, 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Seville, (2005).
 - 13) J. GOLIAS, G. YANNIS, C. ANTONIOU : Classification of driver assistance systems according to their impact on road safety and traffic efficiency, Transport reviews, Vol. 22(2), (2002)179-196.
 - 14) iMobility Forum, Monitoring Priority Systems, 05 November, (2014) www.imobilitysupport.eu/imobility-support/work-packages/wp3-support-to-its-deployment/monitoring-priority-systems.
 - 15) C. JOIN, F. CHAXEL, M. FLIESS : "Intelligent" controllers on cheap and small programmable devices, in 2nd Int. Conf. Control Fault-Tolerant Systems, Nice, (2013).
 - 16) C.-J. KAHANE, J.-N. DANG : The Long-Term Effect of ABS in Passenger Cars and LTVs, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, (2009).
 - 17) A. KHODAYARI, A. GHAFFARI, S. AMELI, J. FLAHATGAR : A historical review on lateral and longitudinal control of autonomous vehicle motions, IEEE International Conference Mechanical Electrical Technology, Singapore, (2010).
 - 18) C. LAURGEAU : Le siècle de la voiture intelligente, Presses des Mines, (2009).
 - 19) L. MENHOUR, B. d'Andréa-Novel, M. FLIESS, H. MOUNIER : Multivariable decoupled longitudinal and lateral vehicle control: A model-free design, IEEE Conference on Decision and Control, Florence, (2013) <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00859444/en/>
 - 20) L. MENHOUR, B. d'Andréa-Novel, M. FLIESS, H. MOUNIER : Coupled nonlinear vehicle control: Flatness-based setting with algebraic estimation techniques, Control Engineering Practice, vol. 22, (2014) 135-146.
 - 21) L. MENHOUR, B. d'Andréa-Novel, M. FLIESS, D. GRUYER, H. MOUNIER : An efficient model-free setting for longitudinal and lateral vehicle control. Validation through the interconnected pro-SiVIC/RTMaps prototyping platform, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (2017).
 - 22) T. NAKADE : Angle control of steering system, JTEKT Internal Technical Report XXX, (2017). (in Japanese)
 - 23) S.A. NOBE, F.-Y. WANG : An overview of recent developments in automated lateral and longitudinal vehicle controls, in IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Tucson, (2001).
 - 24) J. VILLAGRA, B. d'Andréa-Novel, S. CHOI, M. FLIESS, H. MOUNIER : Robust Stop-and-Go control strategy: an algebraic approach for nonlinear estimation and control, in Int. J. Vehicle Autonomous Systems, 7, (2009)270-291, <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00419445/en/>.
 - 25) K. YOSIDA : Operational Calculus, Applied Mathematical Sciences, Vol. 55(1984).