

論文・解説

40

「人馬一体」を実現する駆動力制御システム開発 Development of Driving Force Control System to Realize “Jinba Ittai”

山崎 篤史*1 名越 匡宏*2 津田 顕*3
Atsushi Yamasaki Masahiro Nagoshi Akira Tsuda
石山 雄貴*4 多田 努*5 渡部 雅晃*6
Yuki Ishiyama Tsutomu Tada Masaaki Watanabe

要 約

“人馬一体”とは「ドライバーが車との一体感を感じること」、「意図どおりにクルマが動くこと」とマツダは定義し、ダイナミック性能共通のねらいとして一貫した取り組みを行っている。マツダはこれまで“人馬一体”を体現するため研究を積み重ね、製品へ織り込みを継続してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

新型MAZDA3から始まる新世代商品群では、ドライバーの体の一部のように動かせることをねらいとし、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動の実現を目指した。本稿では、“人馬一体”を実現する新たな駆動力制御システムについて紹介する。

Summary

Mazda's development of vehicle dynamic performance has been consistently performed with “Jinba Ittai” concept, defined as “oneness feel between car and driver” and “vehicle moves as driver intends”. Mazda accumulated researches for the realization of the concept, and the outcomes have been incorporated in production vehicles.

For Mazda's next generation cars starting with All-New Mazda3, aiming to achieve a vehicle that moves as a part of the driver's body, linear vehicle behaviors matching human basic behavioral characteristics without delay and noise is targeted, so that vehicle dynamic behaviors are synchronized with human's natural behaviors. This paper introduces the new driving force control system for the realization of the “Jinba Ittai” concept.

Key words : Vehicle Dynamics, Vibration, Noise, and Ride Comfort, Body Vibration While Driving, Motion Control, Device Technology/Control Technology, Driving Force Control System

1. はじめに

新型MAZDA3から始まる新世代商品群に採用した駆動力制御システムでは、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動の実現を目指した。

本稿では、“人馬一体”を実現できた状態、実現するための課題について解説し、課題を解決する新たな駆動力制御システムについて紹介する。

2. 駆動力制御システムのねらい

2.1 目指す姿

マツダは、“人間中心のものづくり”を一貫した哲学として掲げ、まるで自分の体の一部のように動かせる、ドライバーの意思とクルマの動きの一体感を追求している。人は道具を使用した際に人間特性に合った挙動を示すものを扱いやすいと感じる。具体的な事例として、水道の蛇口を捻った際に想定どおりの手ごたえで想定どおりのタイミングに想定どおりの水量が得られると扱いやすいと感じる。対して手ごたえが軽い割に水量が多く出

*1,2 PT制御システム開発部
PT Control System Development Dept.

*5,6 ドライブトレイン開発部
Drivetrain Development Dept.

*3,4 走行・環境性能開発部
Driveability & Environmental Performance Development Dept.

る、あるいは水が出るタイミングが遅れると違和感があり扱いにくいと感じる。これをクルマに置き換えても同じであり、加速したいと思いきアクセルを踏み込んだ際に思い通りの加速を得られると扱いやすいと感じる。

アクセル操作に対する理想の車両挙動のイメージをFig. 1に示す。操作に対して遅れを感じない応答、操作に対してリニアな応答、ショックや振動（ノイズ）がない加速度、これらを具体化し人の特性に合った挙動を実現することで扱いやすい理想的なクルマ造りを目指した。

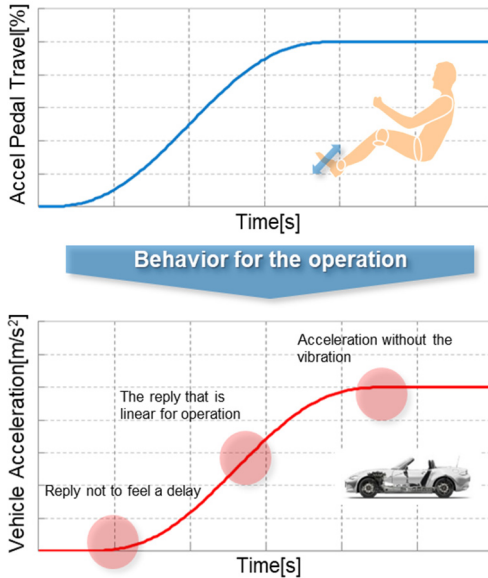


Fig. 1 Ideal Vehicle Behavior

2.2 背反性能のブレイクスルー

アクセル操作に対する理想の車両挙動に対し、従来の駆動力制御システムではレスポンスと振動・ショックの両立に課題がある。操作に対してリニアな応答を実現するためにレスポンスを良くすると不快な振動・ショックが発生する。また、トルクの入力を抑え振動・ショックを抑制するとレスポンスが悪化する。つまり、これらの性能はトレードオフの関係性にあり、この中で両立解を設定するのが通常の開発手法である。

新世代の駆動力制御システムではレスポンスと振動・ショックの各性能をブレイクスルーして高次元で両立できる状態とし、本来実現したいドライバー操作に対するリニアな車両応答の実現を目指した (Fig. 2)。

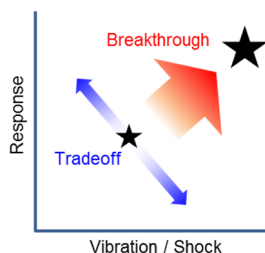


Fig. 2 Breakthrough of the Contradictory Performance

3. 駆動力制御システム構想

3.1 駆動力制御構想

新世代の駆動力制御では、背反性能をブレイクスルーして“人馬一体”を一括開発で実現するため、目標の車両加速度を描き、駆動系システム特性に対してあるべきエンジントルクを常に指示する制御を構想した (Fig. 3)。この実現にはドライブシャフト(以下、D/S)のねじれ角を常に正しく把握する技術が重要となる。以下でこれらの詳細を説明する。

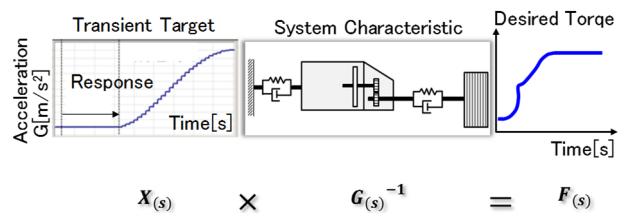


Fig. 3 Concept of the Driving Force Control

3.2 目標ドライブシャフトねじれ角制御

描かれた目標を実現するために、車両の前後運動とホイールの回転運動とドライブシャフトの回転運動を表現した運動方程式を用いて目標車両加速度をD/Sねじれ角に変換し、その目標D/Sねじれ角に実D/Sねじれ角を追従させることで目標の加速度を実現する制御を構築した (Fig. 4)。

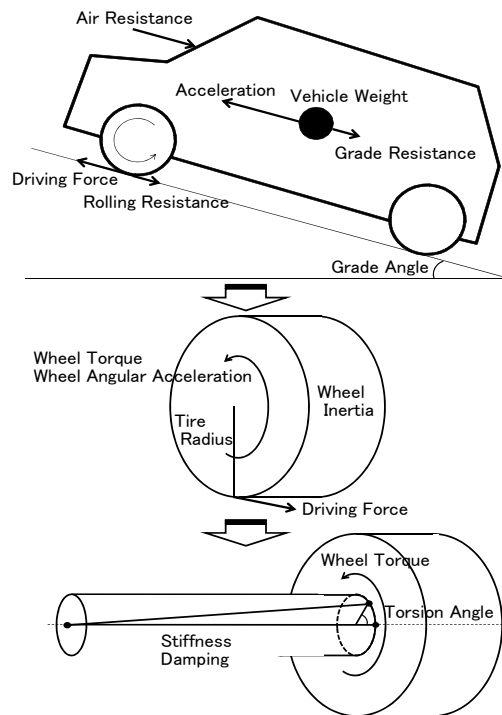


Fig. 4 Target D/S Torsion Angle Control

目標をD/Sねじれ角にした理由は、振動の主要因がD/Sのねじれ一次共振のためねじれ角をコントロールできれば振動を抑制できると考えたからである。この制御をモデルベースで構築することで、派生車種などへの対応の際も、D/Sねじれ角を管理指標として制御することで車両諸元値の変更のみで制御可能となる。

3.3 制御構成

目標D/Sねじれ角制御の制御系はFig. 5のように構成しており、実D/Sねじれ角を目標D/Sねじれ角に応答良く追従させるため、フィードフォワード（以下F/F）制御は駆動系システム特性の逆モデルを使用する。また、F/F制御に用いるモデルのモデル化誤差や外乱による実D/Sねじれ角のズレを補正するためフィードバック（以下F/B）制御を併用する。F/Bに用いる実D/Sねじれ角は、オブザーバにより推定する。オブザーバとは、直接計測できないパラメーターの値を推定するために、他の計測可能なパラメーターの値を代入してシステムの作動を模擬するものである。

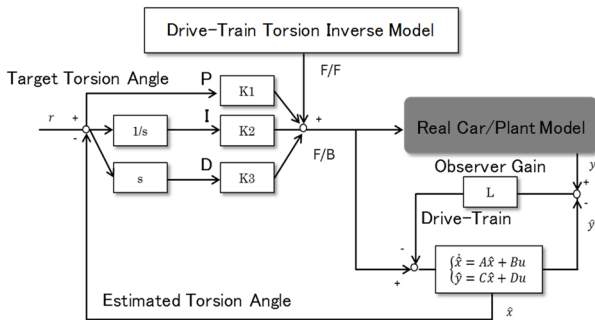


Fig. 5 Control Constitution

この制御系ではモデル化誤差を補正するF/Bが重要であるため、F/Bに用いる実D/Sねじれ角の推定精度が非常に重要となる。Powertrain Control Module（以下、PCM）の限られた処理能力の中でシンプルなモデルを用いて推定精度を確保した領域を広げるには駆動系の非線形領域への対処が課題となる（Fig. 6）。以下で今回の対処の内容を説明する。

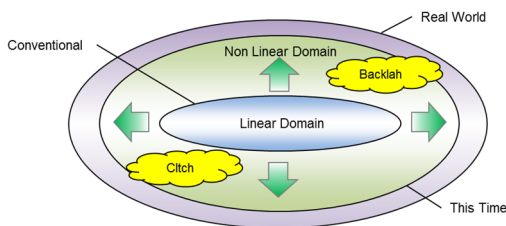


Fig. 6 Estimated Domain

3.4 オブザーバ

オブザーバモデルは、通常はシンプルなエンジンからタイヤまでの常時締結状態のモデルだが、クラッチの締結状態が変化するとシステム特性が実際と大きくずれるため、クラッチ操作中から締結後所定期間はD/Sねじれ状態の推定精度を確保できなかった。その対策として、Fig. 7のようにクラッチ後からタイヤのモデルに変更することで、クラッチ締結状態の影響を受けないモデルとなり、推定精度を確保した。これにより、発進・変速時に従来制御より早くフィードバックを開始できるため、振動収束の早期化が可能となる。この変更には、オブザーバモデルに入力する実値としてクラッチ後の回転数が必要であり、後述するP軸回転数センサーを採用した。

以上はMT車について述べたが、AT車についても非線形要素に対処するためオブザーバモデルをトルクコンバーター後からタイヤまでのモデルとした。

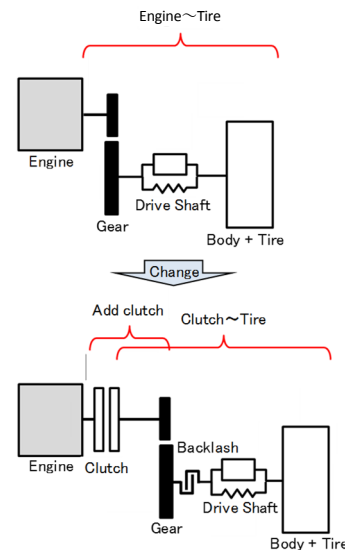


Fig. 7 Improvement of the Observer Model

また、D/Sの反力を受けパワートレイン全体が、ねじれる挙動を再現するため、マウントモデルを追加し推定精度を向上した（Fig. 8）。

- J_m : Engine Inertia
- η : Gear Ratio
- J_b : Vehicle Inertia
- J_{pt} : Powertrain Inertia
- θ_m : Mount Torsion Angle
- ω_e : Engine Angular Velocity
- K_b : D/S Stiffness
- ω_v : Wheel Angular Velocity
- ω_{pt} : Mount Torsion Angular Velocity
- K_m : Mount Stiffness
- T_e : Engine Torque
- C_b : D/S Damping
- T_b : Running Resistance
- C_m : Mount Damping

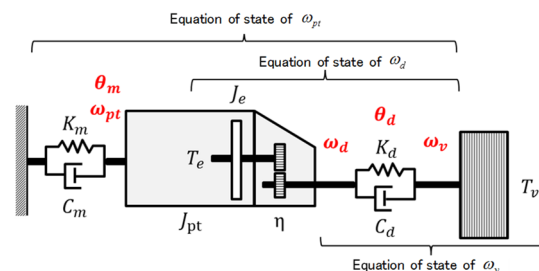


Fig. 8 Added the Mount Model

更に、D/Sねじれ角を逐次推定するためには、駆動系非線形領域（ガタ）の推定が必要であり、ガタ領域について、エンジントルクを入力、ガタ角を出力としたガタ角推定モデルを構築した（Fig. 9）。

J_m : Engine Inertia ω_e : Engine Angular Velocity T_e : Engine Torque
 K_b : D/S Stiffness C_b : D/S Damping J_b : Vehicle Inertia
 ω_v : Wheel Angular Velocity T_b : Running Resistance
 θ_b : Backlash Angle b : Backlash width

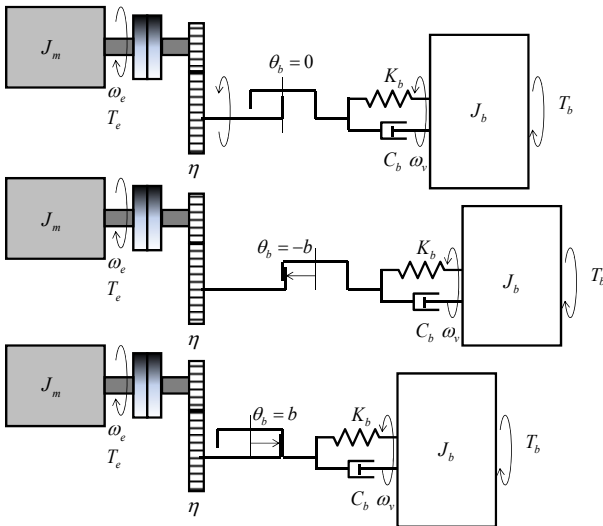


Fig. 9 Backlash Model

上記ガタ角推定モデルとD/Sねじれ角推定モデルをスイッチングすることでガタ領域とガタ領域以外の推定を連続的につなげた（Fig. 10）。

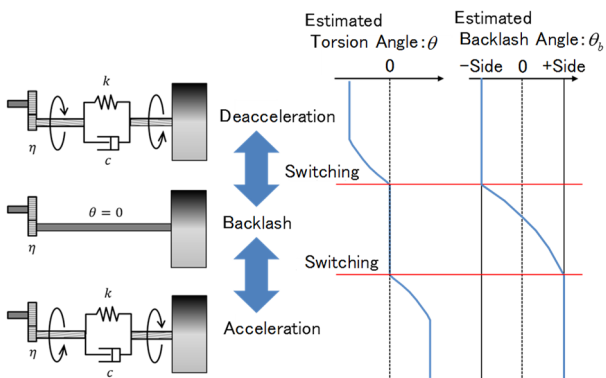


Fig. 10 Model Switching

4. P軸回転数センサー

クラッチ操作中のオブザーバ推定精度を改善するため、P軸回転数センサーを採用した。P軸回転数センサーは、Fig. 11に示すトランスミッションのPrimary軸の回転数を検出するセンサーである。

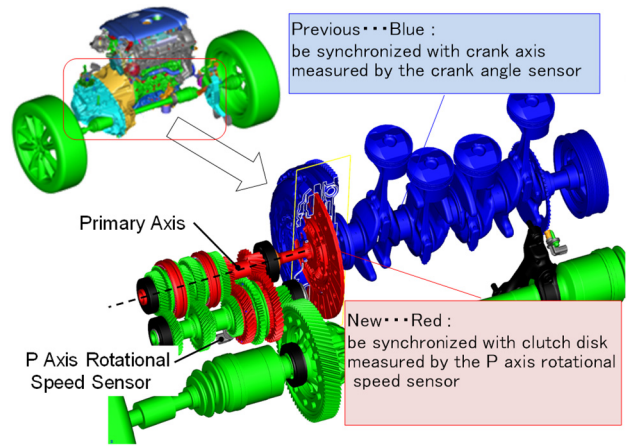


Fig. 11 P Axis Rotational Speed Sensor

本センサーは、GMR（Giant Magneto Resistive effect）センサーを採用し、クラッチディスクと同期している凹凸のある回転体（2ndギア）との磁力変化により回転数を検出する方式とした（Fig. 12）。

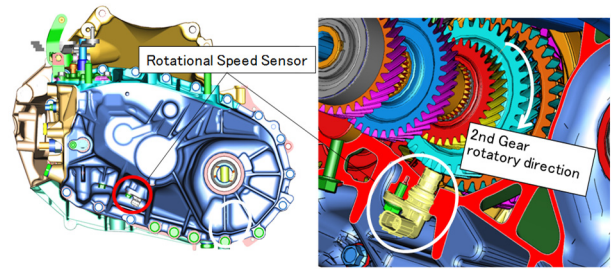


Fig. 12 Detection Method of the P Axis Number of Revolutions Sensor

5. モデルと試作車による推定精度検証

P軸回転数センサーを用いたD/Sのねじれ角推定について、詳細モデルによる机上検証を実施した上で、実車検証を実施することで、短期間で高精度なオブザーバを構築した。机上検証結果をFig. 13に示す。D/Sねじれ角をねらいの精度で推定できることを確認した。

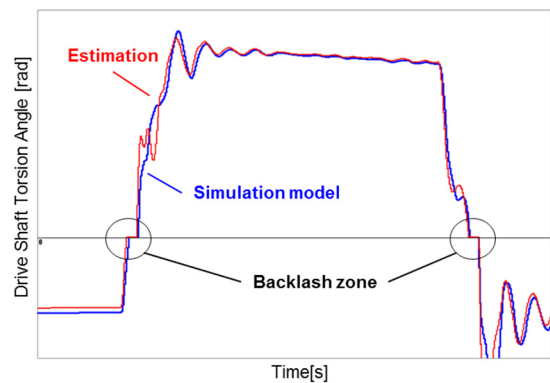


Fig. 13 Simulation of Estimated Torsion Angle

実車にて推定精度の良否を判断するため、D/Sにトルクメータを取り付け、P軸回転センサーの取り付けに対応したミッションケース及びハーネスを試作し検証車両を製作した。また、PCM制御にP軸回転センサーを使用可能とする変更を織り込んだ試作ソフトウェアを作成して実車にて検証した。推定精度の検証にあたり、ねじれ量と伝達トルクを計測した。

検証結果をFig. 14に示す。机上検証時と同様の精度でD/Sのねじれ角を推定できることを確認した。

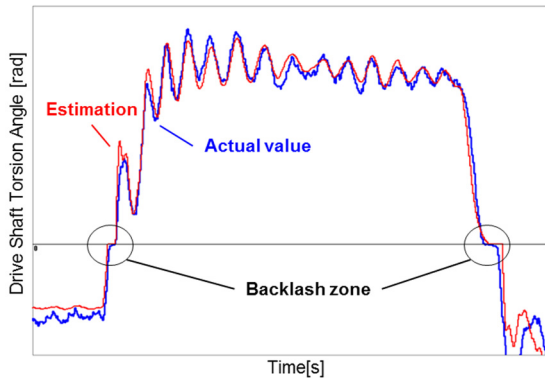


Fig. 14 Experiment of Estimated Torsion Angle

6. 制御設計

駆動力制御システムの制御設計は、モデルベース制御を採用し、実機適合を大幅に低減した上で、制御目標への追従性を改善した。ここでは、その内容を紹介する。

6.1 フィードフォワード制御

F/F制御は、エンジントルクを入力、D/Sねじれ角を出力とした駆動系システム特性モデルの逆モデルで構築した (Fig. 15)。

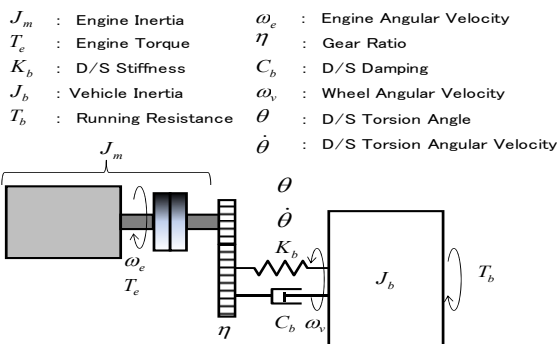


Fig. 15 Model of the Feedforward Control

6.2 フィードバック制御

F/B制御は、オブザーバによる推定D/Sねじれ角を用いたPID制御である。PID制御のF/Bゲインについて、理論

的な制御器設計をするため、内部モデル制御 (Internal Model Control : 以下, IMC) を適用した。

IMCはF/Bゲインの導出にプラントモデルを使用する制御である。また、目標の成形・モデル化誤差等を考慮したロバストな設計になるよう制御系にフィルターを有している。F/F制御とF/B制御で構成される2自由度制御系のIMCを設計するとFig. 16となる。F/F制御は駆動系逆モデルにフィルターをかけたものをゲインとして使用し、F/B制御はFig. 16の青枠のようなゲインとなり、フィルターとF/B用プラントモデルから構成されるため、モデルを与えれば、調整するパラメーターはフィルター時定数のみである。

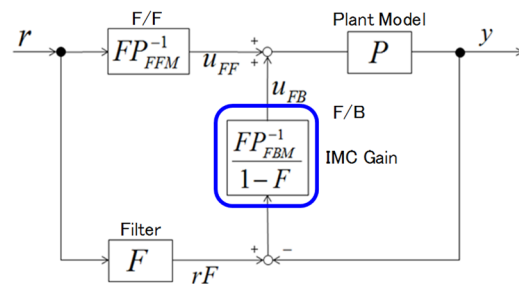


Fig. 16 Internal Model Control (IMC)

通常、PID制御はP/I/Dゲインの3パラメーターがあり、3パラメーターを試行錯誤で調整すると大変時間がかかるが、今回、IMCゲインをP/I/Dゲインに等価変換し、調整パラメーターをフィルター時定数のみとした上で、周波数特性を考慮して時定数設定することで、試行錯誤することなしにP/I/Dゲインを決定した。Fig. 17にフィルター時定数と制御+プラントの周波数特性の関係を示す。時定数が小さいほど、ゲインの損失が少なく、応答性が高いことを示している。本システムでは応答性を重視し、時定数を小さく設定した。

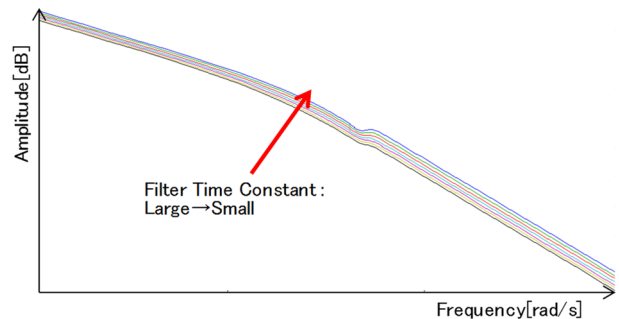


Fig. 17 Bode Plot of Closed-Loop Transfer Function

7. 駆動力制御システムの効果

最後に、今まで説明してきた駆動力制御システムの代表的な効果を紹介する。加速シーンと発進変速シーンについて現行制御と新制御の比較をFig. 18, 19に示す。現

行制御でトレードオフの中、応答性を重視したセッティングに対して、新制御では同等以上の応答性を確保しつつ全走行領域で振動・ショックのレベルを改善させた。これにより不快なノイズの発生を抑制しつつドライバーの意図に合ったリニアな車両挙動を実現した。

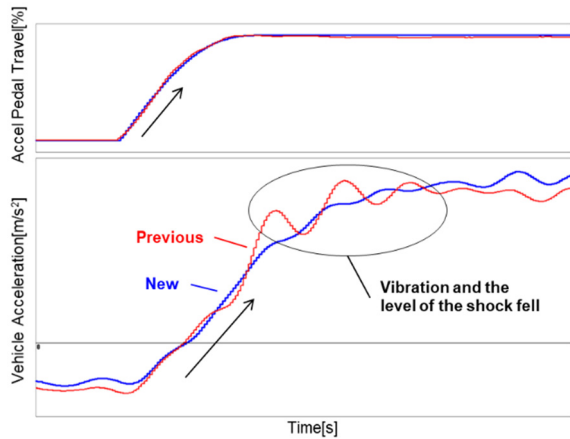


Fig. 18 Comparison of the Accelerating Scene

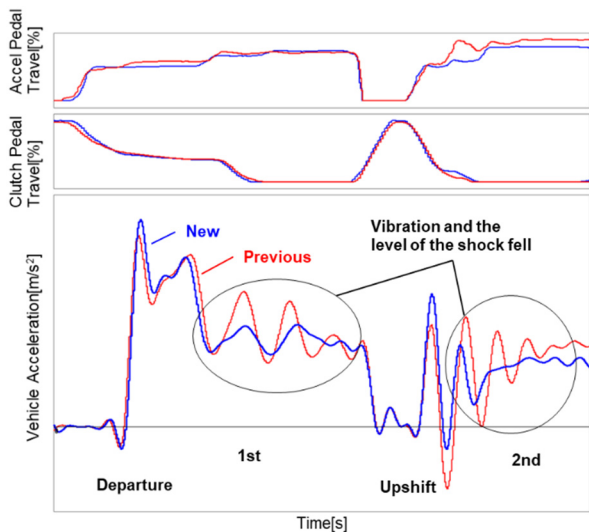


Fig. 19 Comparison of the Scene Performing Departure & Upshift

8. おわりに

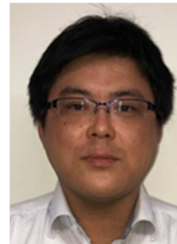
レスポンスと振動・ショックのトレードオフをブレイクスルーできたのは、観測技術を改善し、得られたD/Sねじれ角により車両を振動させないF/B操作量を逐次決定できる制御システムを構築したためである。

新型MAZDA3では、ドライバーの意図どおりの動きをさせることをねらいとし、人間の自然な動作と車両挙動を合わせるため、遅れやノイズなく、人間の基本行動特性に合うリニアな挙動を実現する駆動力制御システムの開発を行った。新型MAZDA3を運転される際に、操作に対して車が素直に反応することを実感していただけると幸いである。

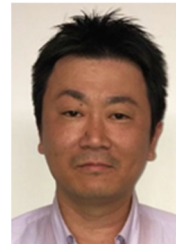
参考文献

- (1) 渡辺ほか：新型デミオのパフォーマンスフィール、[マツダ技報, No.32, pp.42-47 \(2015\)](#)
- (2) 兼為ほか：人馬一体 新型ロードスターのパフォーマンスフィール、[マツダ技報, No.32, pp.114-118 \(2015\)](#)

■ 著 者 ■



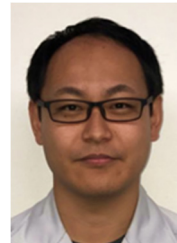
山崎 篤史



名越 匡宏



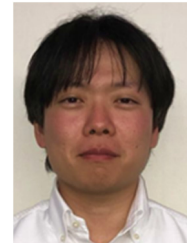
津田 顕



石山 雄貴



多田 努



渡部 雅晃