

パワープラント系制御開発用ドライビングシミュレータ

Driving Simulator for Power Plant Controller Development

小 堂 智 史*

Satoshi KODO

小 野 高 志**

Takashi ONO

藤 本 茂 希*

Shigeki FUJIMOTO

鈴 木 哲 也***

Tetsuya SUZUKI

要 旨

ABSTRACT

既報 (MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと段階的システム同定環境の構築) で構築したプラントモデルを実装した Hardware in the Loop Simulation 環境に, パワープラント系制御開発に必要とされる最小構成のドライビングシミュレータ環境を追加した. これにより, モデルベース開発の上流工程における仮想車両テストに, 最終工程における実車テストで得られる人の臨機応変な操作を取り入れる開発環境を構築した. 構築したドライビングシミュレータを用いて, 人によるドライバ操作を計測し, ドライバモデルでは得られない周囲のさまざまな状況に臨機応変に対応する人の操作を得られることを確認した. また, 実際の制御開発への適用をおこない, 日常の運転状況において発生する制御の課題の発見に役立つことを実証し, モデルベース開発の精度向上に役立つことを確認した.

A driving simulator environment with the minimum configuration considered necessary for power plant controller development was added to a Hardware in the Loop Simulation environment that mounts the plant model created in the previous report (Development of High-performance Engine Plant Model and Sequential System Identification Environment for Realization of Model-based Development). This created a development environment that makes it possible to incorporate situational maneuvers performed by humans, which were previously acquired through actual vehicle tests in the final process of model-based development, into the virtual vehicle tests in the upstream processes. Driving maneuvers performed by humans were measured using the created driving simulator, and it was confirmed that maneuvers performed by humans in response to various surrounding situations can be acquired, which was not possible with a driver model. In addition, the created driving simulator was applied to actual controller development, and was verified to be useful in discovering control issues that occur in everyday driving situations, and to increase the accuracy of model-based development.

1. ま え が き

モデルベース開発 (MBD) では, 実在しないコンポーネントをプラントモデルとして開発の上流工程に再現することにより, 最終工程でおこなう実車テストを各上流工程においても仮想的に実施する. これにより, 各工程におけるアウトプットの精度向上をおこない, 下流工程からの開発の手戻りを削減し開発コストを低減すると共に, 開発のフロントローディングによる短期開発や品質の向上を実現している.

Fig. 1 にコントローラとプラントモデル, ドライバの関係を示す. 既報⁽¹⁾において構築した High Performance Engine plant Model (HPEM) を用いることにより, コントローラの制御指示値に対し, リアルな挙動を示すプラントモデルからの応答を用いてコントローラ設計をおこなえる環境が整備された. このことから, 従来に対し, 開発の上流工程にて精度の高いコントローラ設計が可能となった. このように, パワープラント系のコントローラへの入力のうち, 制御対象であるプラントモデルの応答の精度は向上した. しかしながら, コントローラへ別系統から入力され

* 四輪 R&D センター

** 株式会社ピーズスタッフ

*** 株式会社両毛システムズ

るドライバ操作は、従来同等の手法を用いることから、これに起因する手戻り工数が依然として発生している。

MBDの上流工程でおこなう仮想車両テストにおいては、排気ガスに関わるエミッション測定用の各国の評価走行パターンや、要求分析およびFault Tree Analysis(FTA)により抽出された特定の条件を再現した評価走行パターンを使用している。ドライバ操作は、これらの走行パターンの目標車速に対し、車速が追従するアクセルペダル操作をおこなう簡易なドライバモデルから生成する手法を従来から用いている。最終工程でおこなう実車テストにおいては、前述の評価走行パターンに加え、テストコースにおける特殊な条件での評価や、さまざまな道路環境において、時々刻々と変化する天候や路面状況、周囲を走行する車両や歩行者といった交通流の影響を想定した道路条件にて評価を実施している。ドライバ操作は、これらの条件において実際に人が車両を運転することにより生成される。そのため、その操作には、人の性格や心理状況、運転技能を含めた、人が周囲のさまざまな状況に対しておこなう臨機応変な操作が含まれ、この臨機応変な操作により制御の課題が発見されることもある。このように、現状のMBDの上流工程における仮想車両テストと最終工程の実車テストでは評価条件が異なり、この評価条件の違いが、開発の手戻りの発生原因や開発のフロントローディングの課題である。

評価条件の違いに起因する課題は、パワープラント系制御のMBD特有の課題ではない。そのため、昨今の自動車業界においては、MBDの上流工程における仮想車両テストに、最終工程の実車テストで得られるドライバの操作を再現させ、MBDの精度向上をおこなう取り組み⁽²⁾がなされ始めている。評価条件を揃えるには、さまざまな道路環境の再現や、天候や路面状態、周囲を走行する車両や歩行人等の道路条件の再現に加え、車両を操作するドライバラインナップの整備が必要である。MBDを効率的におこな

うためには、これらすべてをモデル化し、多様な特性を持つ複数のドライバモデルを用いて、さまざまな条件で世界中の道路における評価をおこなうのが効率の観点で理想的である。車両を構成する各コンポーネントの運転領域の把握等のように、さまざまな道路環境や道路条件に対しての代表的な操作が必要とされる評価へのドライバモデルの適用は、比較的難易度は高くない。一方で、ドライバの操作に基づいて高周期で演算を実施するパワープラント系制御は、あらゆるドライバの操作に対して成立する必要がある。そのため、その評価に用いるドライバの操作には、人が周囲のさまざまな状況に対し臨機応変におこなうすべての操作が求められる。しかしながら、そのような操作をおこなえるドライバモデルには、理想的な運転をする自動運転制御⁽³⁾に加え、人の性格や経験、感情を考慮した制御の構築が必要となるため難易度が高い。また、各種評価の結果を解析する際に、多様な状況におけるドライバモデルの挙動の確からしさが常に問われることとなる。

そこで今回は、道路環境と道路条件についてはモデルによる仮想再現をおこなった。一方で、ドライバラインナップについてはモデル化を実施せず、仮想再現した道路を人が運転するドライビングシミュレータ環境を構築した。

2. 開発のねらい

研究開発用のドライビングシミュレータとしては次のような適用例が見受けられる。ドライバの行動解析では、人の飛び出しなど実車でおこなうことが不可能な条件におけるドライバの挙動解析⁽⁴⁾に使用されている。一方で、車内のスイッチやメータ等のHuman Machine Interface(HMI)の開発では、操作性や視認性等の検討に使用されている。また、制御開発では、自動ブレーキや車両の横滑り防止制御などの自動操縦や予防安全の検討に使用されている。最近では、車両の操安性や乗り心地といったよりリアルな車体挙動を再現できるシミュレータ環境が必要とされるビークルダイナミクスへの適用も進んでいる。

重要視されるドライビングシミュレータの機能は、使用用途により異なっている。ドライバの行動解析やHMIの開発では、視覚情報やドライバの周辺機器に対する触覚であり、ビークルダイナミクスでは車体のリアルな挙動の演算に加え、ドライバが加速度や振動等をリアルに体感できることになる。そのため、前者では実際の車両やその一部を切り出すことにより再現した運転席が用いられる。後者には、実車に忠実な車体挙動を演算するプラントモデルとその演算結果を人に体感させるモーション装置が用いられる。

車両のすべてをリアルに再現したドライビングシミュレータを用途に関係無く使用するのが理想的である。しかしながら、車両と同等の運転席を用いると重量が重くなる

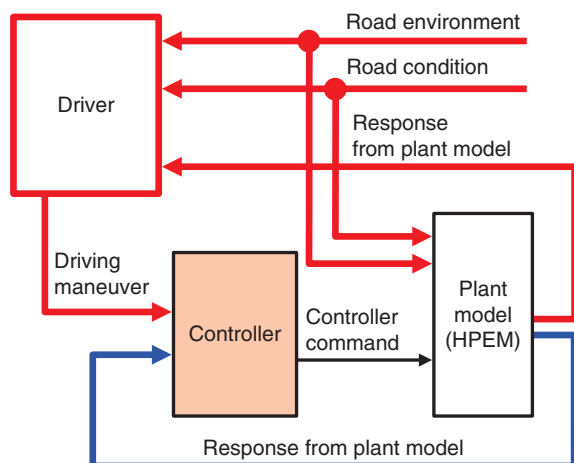


Fig. 1 Input and output of controller

ことから、モーション装置のアクチュエータへの要求負荷能力が大きくなる。そのため、忠実な加速度の再現には、より強力なアクチュエータが必要となるなどのトレードオフの関係が存在する。このことから、すべての要求を成立させるためには、膨大なコストが掛かる巨大な設備が必要となってしまう。また、プラントモデルに関しても、車両のすべてを忠実に再現するには、作成、設定工数が膨大になると共に、計算負荷が大きくなる。そのため、実時間で演算をおこなうには、より高価な演算装置が必要となる。

以上のように、理想的なドライビングシミュレータ環境を追及すると作業工数、費用の両方が増大する。MBDの目的は、開発の手戻りを削減することによる開発コストの低減や開発のフロントローディングによる短期開発や品質の向上である。そのため、ドライビングシミュレータの構築に必要なコストがMBDにより得られるコスト低減量より高額であったり、構築に必要な作業工数が多く、開発のフロントローディングに影響が出ては目的が達成できない。そのため、低コストかつ低工数でMBDの最大の効果を引き出すためには、目的に対して適切なドライビングシミュレータ環境を構築する必要がある。

3. 制御開発用ドライビングシミュレータの構築

3.1. 制御開発に必要な機能

制御開発は、制御対象の動特性の把握、制御ロジックの作成、設定値の適合のステップに大きく分けられる。そのため、ドライビングシミュレータに用いるプラントモデルは、これらのステップに対応する必要がある。

制御対象の動特性の把握や制御ロジックの作成において、プラントモデルは、車両全体から抜き出した開発中の制御に関連する動特性や、作成した制御ロジックの妥当性の確認に使用される。そのため、プラントモデルは、制御開発者が把握している動特性に加え、想定外の動特性も表現できなければならない。想定外の動特性を表現するためには、入力に対し原理原則にのっとった応答を出力できる必要がある。このことから、制御開発者が把握している特性であるマップの組み合わせ等ではなく、物理的な法則や実験式による構成が求められる。

設定値の適合では、原理原則にのっとった応答に加え、その応答の絶対値の精度も求められる。しかしながら、モデルの詳細度により差はあるものの、プラントモデルは、実物の動特性が単純化されて表現されているにすぎない。そのため、実機同等の精度で設定値の適合を実施することは不可能であり、設定できる適合値の精度は、プラントモデルの精度に比例する。一方で、開発されたパワープラントは複数の車体に適用されると共に、開発完了後に車体のバリエーション展開が増加する場合もある。そのため、開発の上流工程において、特定の車体に対する設定値の適合

を厳密におこなっても、開発の手戻りの削減や開発のフロントローディングにはつながらない。このことから、開発の上流工程における設定値の適合では、設定値の設定範囲を限定する暫定適合を実施できれば良いと考える。そのため、ドライビングシミュレータに用いるプラントモデルの応答の絶対値の精度は、必ずしも必要では無い。

Fig. 2に、プラントモデル、コントローラ、外部情報とドライバとの関係を示す。プラントモデルの挙動は、大きく分けると視覚情報、聴覚情報、体感としてドライバに伝えられ、人の臨機応変な操作の情報源となる。

視覚情報は、車両の走行速度や旋回、傾斜状態として、聴覚情報は、エンジン回転数に対するエンジン音、車速に対するロードノイズの変化として伝えられる。これらの実物との差は、そのまま人が感じる違和感となるため、現状において入手可能な限り高い精度が求められる。

一方で、車体違いの影響を受ける体感については、人が実物との差を車体違いの影響と誤認するため、パワープラント系の制御開発において、体感の精度は重要では無いと考える。そのため、パワープラントの出力変化に応じた車体挙動の変化や、パワープラントの課題に起因して発生する振動等を人が体感できれば良い。

また、ドライバはプラントモデルの応答に加え、道路環境や道路条件といった外部から受ける視覚情報に応じて操作を決定する。これらの視覚情報は、多くの場合、ドライバの意思とは無関係に与えられる。また、与えられた視覚情報が想定外であるほど、人の性格や心理状況、運転技能の影響が顕著に表れ、普段の運転との差が大きくなる。そのため、前述の簡易なドライバモデルによる評価走行パターンでの走行では得られないドライバ操作となる可能性が高く、制御の課題の発見に有用となる。このことから、日

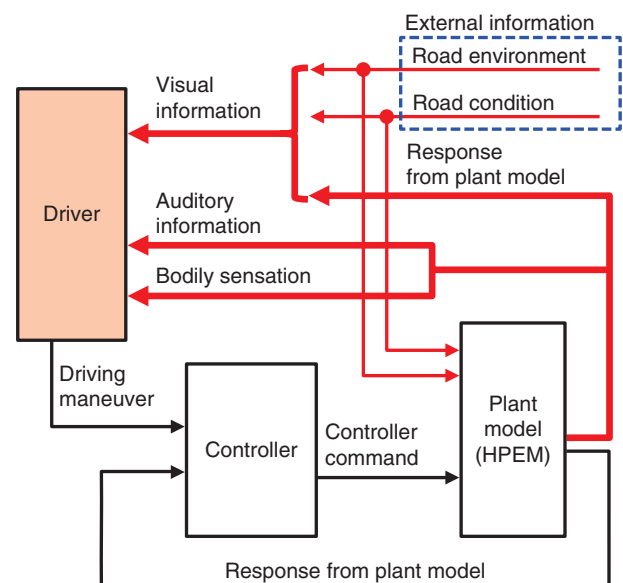


Fig. 2 Input and output of driver

常にありえる運転状況に加え、まれな運転状況も再現できる映像ライブラリや運転状況のシナリオも必要である。

3.2. ドライビングシミュレータの構成

構築したパワープラント系制御開発用ドライビングシミュレータの全景を Fig. 3 に、構成を Fig. 4 に示す。ドライビングシミュレータは、研究開発用に市販されている模擬視界装置と、仮想車両であるプラントモデルの演算をおこなう Hardware in the Loop Simulation (HILS)、人が運転操作をする運転席、パワープラント系制御を実装した ECU により構成される。

模擬視界装置は、自車両の走行条件や効果音、周囲の交通流の状態を演算するホスト PC と、周囲の風景を演算する映像演算用 PC、その結果を表示する映像表示装置とスピーカから構成される。



Fig. 3 Overview of driving simulator

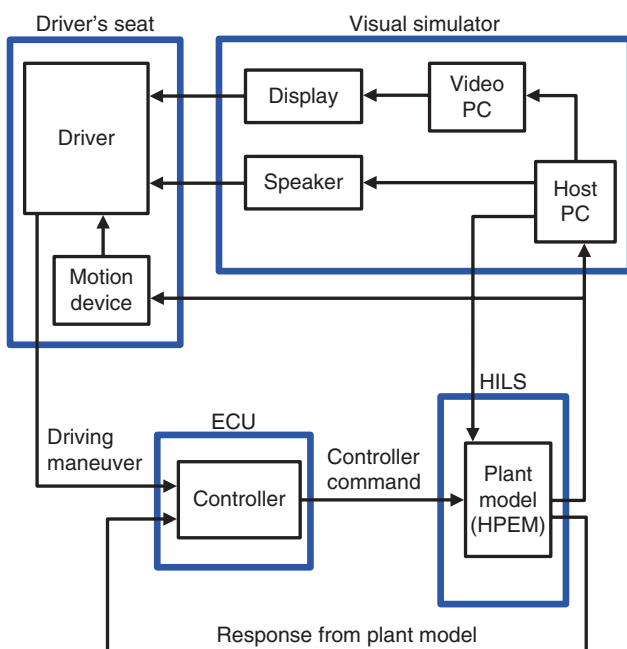


Fig. 4 Configuration of driving simulator

ホスト PC は、走行する道路の勾配や摩擦係数、風速、自車位置等の走行条件に加え、任意に設定できる周囲の交通流の演算をおこなう。具体的には、交通ルールに従って走行する車両や、急ブレーキや蛇行運転などの特殊な挙動をする車両、また、信号機の任意のタイミングにおける操作や歩行者の再現等がおこなえる。これらを組み合わせることにより、日常的にありえる運転状況から、まれな運転状況までさまざまなシナリオを設定することが可能となっている。また、プラントモデルの挙動に応じた効果音の演算、出力もおこなう。

映像演算用 PC は、映像ライブラリとして、実在する市街地や高速道路、山道に加え、任意に作成可能な仮想市街地や仮想高速道路を備えており、さまざまな道路環境の再現が可能である。また、時間帯に応じた明暗の変更や雨や雪といった天候の選択も可能となっていると共に、多様な車種の四輪車や二輪車、歩行者の表示も可能である。

映像表示装置は運転中の巻き込み確認時の視野角を考慮し、55 インチ液晶ディスプレイ 5 台により、約 210 度の視野角を確保した。

仮想車両の挙動の演算は、ECU の制御指示値と、ホスト PC が算出する走行条件を用いて HILS でおこなう。搭載するプラントモデルは、パワープラント系については、既報で構築した HPEM を用い、車体系には、市販のフルビークル動力学モデルを用いている。パワープラント系のプラントモデルには、制御指示値に対し原理原則にのっとった応答が求められると共に、人の時間感覚に合わせるために、実時間での確実な演算が要求される。HPEM は、物理的な法則や実験式による記述で構成され、MBD のコントローラ階層のテストで使用可能な挙動を満たすと共に、HILS 上にて実時間計算が安定的におこなえる。そのため、特別な改修をすることなく適用することができた。なお、既報に記載のとおり、プラントモデルの出力値は、実機での計測値に対し 3% 以内の誤差精度を確保しており、制御の設定値の暫定適合に対しても十分な精度を確保できている。

車体系のプラントモデルは、バネ上ボデー、バネ下ボデー、車輪等の計 10 の剛体が、それぞれの移動および回転軸に対し計 27 の自由度を持つ動力学モデルとなっている。ボデーに空力特性、サスペンションとステアリングにキネマティクスやダイナミクス特性、タイヤに縦横フォース特性や転がり抵抗、緩和長等を設定することで、車両の運動挙動をシミュレートすることができる。

また、HILS を用いることにより、実物の ECU とプラントモデルの接続を実現し、ドライビングシミュレータにて開発したパワープラント系制御を実機フェーズへスムーズに移行できるようになっている。

運転席は、研究開発用に販売されている高価な物は用いず、PC 用レースゲームのハードユーザ向けに販売されている市販品を組み合わせることにより構築した。これらの

商品でもリアリティのある操作フィーリングや、車体挙動の変化、振動等の体感を得られる。また、ハンドルやペダル、シフトのフィーリングや車両挙動は、車種のジャンルや車格により異なることから、パワープラント系の制御開発用途に対しては、必要な機能を有していると考ええる。

4. ドライビングシミュレータの効果

構築したドライビングシミュレータにより得られる人の臨機応変な操作の一例を示す。

Fig. 5 に、所定の車速パターンで走行する前方車両を追従走行する条件を用いて計測した、車速とアクセルペダル開度、トランスミッションのギヤ段を示す。開発メンバによる人での計測は、ドライビングシミュレータによりおこなった。テスト条件は、日常生活における各々の普段通りの運転としている。ドライバモデルについては、前方車両と一定の車間で走行したと仮定して、前方車両の車速パターンを目標値とした Proportional Integral Derivative (PID) 制御によりアクセルペダルを操作して走行した結果となっている。

今回得られた人の結果には、40 s 以降の緩加減速運転時において、車速パターンに対し長周期で変化する車速差が見られると共に、その車速差は各々で異なっている。これは、視覚情報より得た車両間隔の変化に対する臨機応変な操作が人により異なるためと考えられる。一方、ドライバモデルは走行パターンを忠実にトレースして走行するため、走行パターンに対する車速差はない。

アクセルペダル開度の比較においても、同一の走行パターンを走行したとは思えないほどの違いがドライバ間で

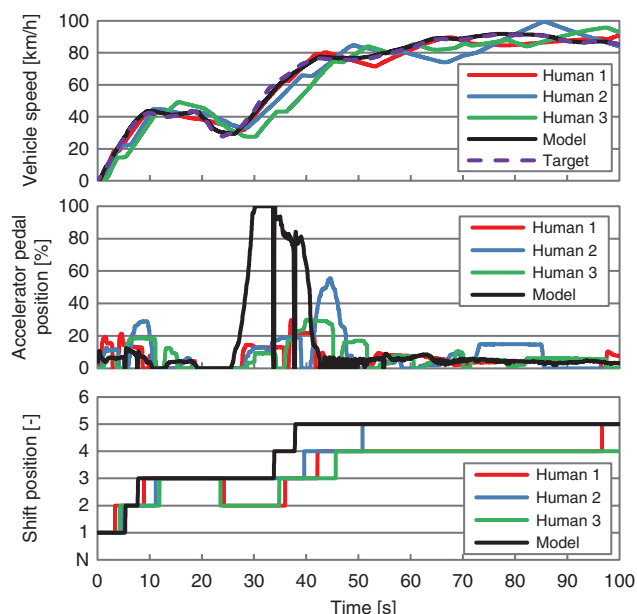


Fig. 5 Following traveling test results

生じた。これは、各々のドライバの性格や経験に基づく運転特性により、選択するギヤ段や前方車両との車間調整の取り方が異なることにより生じていると考えられる。

また、ドライバモデルと人の違いは、Fig. 6 に示すように、単位時間当たりのアクセルペダル開度変化量に顕著に表れている。明確な加減速運転である 0 s から 30 s 間においては大きな差は見られないが、破線で示す 40 s 以降の緩加減速運転時においては、人は前方車両に対し臨機応変に車両間隔を決定しているため、アクセルペダル開度を保持している時間が長く、緩急のある操作となっている。一方で、ドライバモデルは、車速パターンを忠実にトレースするために、常に緻密なアクセルペダル操作となっている。

以上のように、ドライバモデルの操作は、追従走行を完璧におこなう機械的な操作となっている。一方で、人による操作では、同一のテスト条件で運転した場合においても各々で異なっている。このように、構築したドライビングシミュレータにより、人の性格や心理状況、運転技能を含めた、人が周囲のさまざまな状況に対しておこなう臨機応変な操作を得ることが可能となった。

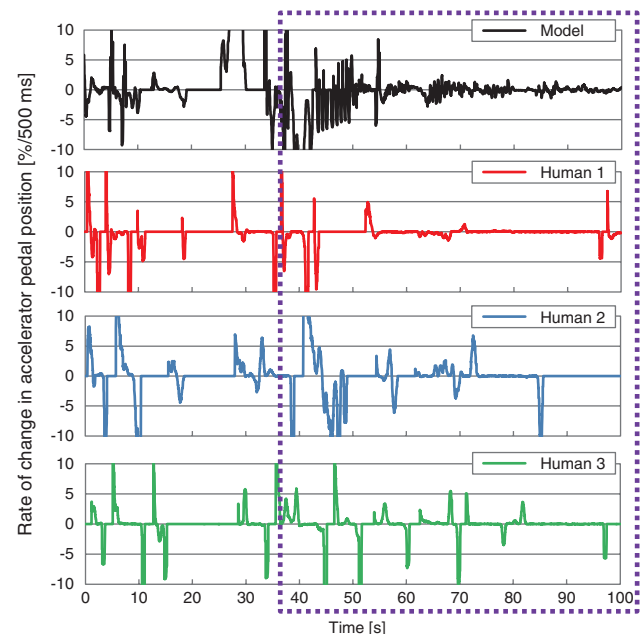


Fig. 6 Comparison of rate of change in accelerator pedal position between human and model

5. 制御開発への適用例

ドライビングシミュレータを制御開発へ適用することにより、制御の課題が判明した一例を示す。

Fig. 7 に、課題が判明した簡易型エンジントルク制御のブロック線図を示す。

コントローラは、フィードバックされたエンジントルク

を用いてトルク目標値となるようにスロットル開度を制御する。また、スロットル開度とエンジントルクの関係は非線形のため、制御性の向上を目的とし、吸入空気量とエンジン回転数に対しスロットル開度を出力する応答曲面モデル⁽⁵⁾を採用している。これにより、PID 制御器は、エンジントルクに対し線形性が強い吸入空気量を制御対象として扱うことができる。

ドライビングシミュレータを用いて、マニュアルトランスミッションの仮想テスト車両で市街地走行を実施したところ、次のような運転状況で制御の課題が発見された。Fig. 8 は、前方を走行中の車両が、反対車線にある店舗の駐車場へ入るために減速し右折をおこなった運転状況を示している。この際に、前方車両がウインカを出し忘れた状態で、対向車両が通過するのを待つための減速をおこなった。そのため、ドライバーは想定外の強い減速をおこなった後、緩やかに加速した。

Fig. 9 に示すように、減速によりエンジン回転数は低下したため、通常であればシフトダウンをしたのちに加速する条件であった。しかしながら、想定外の強い減速による心理状態への影響により、ドライバーはシフトダウンをおこなわないままアクセルペダルを踏んだところ、エンジンの出力トルクの変動が発生した。その後、課題の確認のために、再度同じ運転状況にて走行したところ、出力トルクの変動は発生しなかった。出力トルク変動の発生の有無で

データを比較すると、再度の走行では、減速量が少なくエンジン回転数の低下が少ない状態から加速が始まっていた。これは、前方車両が強い減速をすることがあらかじめわかっていたために、ドライバーが無意識の内に車間距離を長くとったためと考えられる。

この結果を受け、原因を究明したところ、Fig. 10 に示す応答曲面モデルの設定に課題があることが判明した。

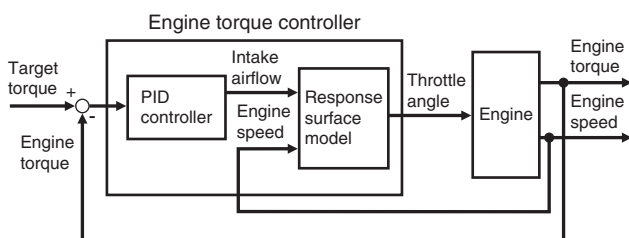


Fig. 7 Engine torque controller block diagram



Fig. 8 Test situation reproduced by driving simulator

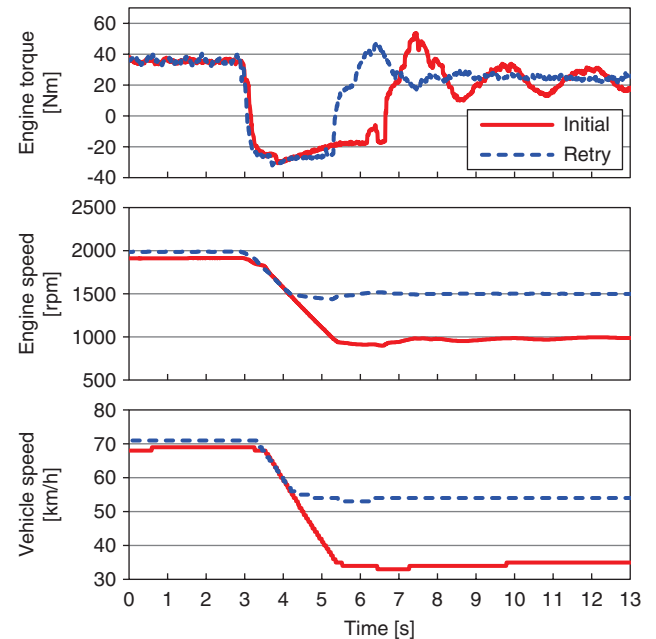


Fig. 9 Original controller behavior

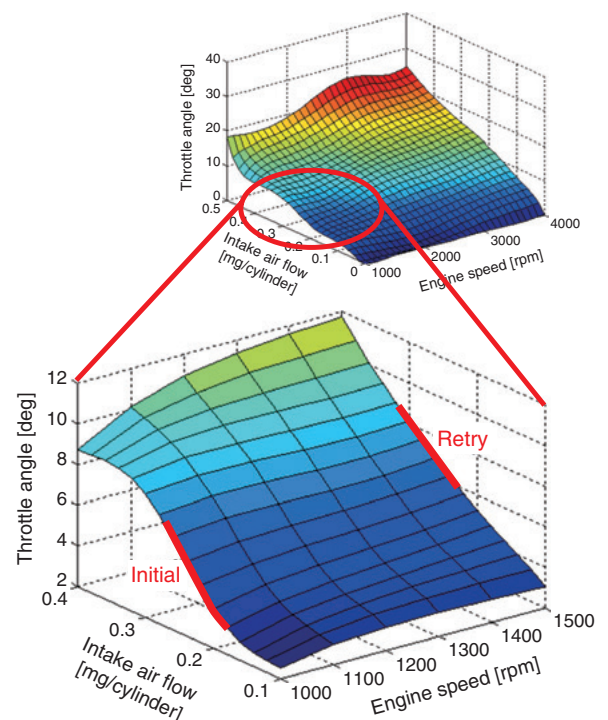


Fig. 10 Original response surface model

課題が発生した運転条件において、吸入空気量に対するスロットル開度の傾きが大きく、線形化が不十分な領域が存在していた。これが原因となり、制御器によるスロットルの操作量が、吸入空気量に対し物理的に必要なスロットル開度の変更量より大きくなり、エンジンの出力トルクの変化も大きくなっていった。これがトリガとなり、フィードバック制御のハンチングが発生し、エンジンの出力トルクの変動を引き起こしていた。

制御の開発初期に応答曲面の妥当性は確認していたが、判断根拠の明確化のために、応答曲面の近似精度を表す決定係数⁽⁵⁾を用いた数値による判断を重視したことが原因の一つであった。そのため、物理的観点からの細部の応答曲面形状の確認と、決定係数の値の両面からの判断をおこなうように、制御仕様の要件表の改訂を実施した。

また、排気ガスに関わるエミッション測定用の各国の評価走行パターンや、要求分析やFTAにより抽出された要件に基づいて作成した加速開始時用の評価走行パターンによる制御全体の評価も実施した。しかしながら、各国の評価走行パターンで網羅されない評価条件であったことと、加速開始時用の評価走行パターンにおいても、目標トルクに対する 10 Nm 刻みの評価点の間隔に対し、課題が発生する領域が狭かったために発見できていなかった。

なお、Fig. 11 に示した応答曲面の改良により、Fig. 12 に示すように、エンジン出力トルクの変動を無くすことができた。

以上のように、今回の制御の課題は、自動車ユーザーの日常の運転の中で存在する運転状況に対して、人がおこなっ

た臨機応変な操作により引き起こされている。一方で、従来から MBD の上流工程で実施していた、評価走行パターンにおける仮想車両とドライバモデルを用いた評価では再現できない運転状況であった。また、テストコースで実施する交通流を想定していない実車両による評価においても、課題の発見は容易ではなかったと推測される。

この一例のように、新規の制御開発時には、要求分析や FTA の結果に基づいて作成した制御仕様の要件表に抜け漏れが生じる場合がある。ドライビングシミュレータを用いて制御を評価することにより、従来の開発手法であれば、開発の最終段階である一般道における交通流を想定した実車両による評価まで発見が難しい制御の課題を、MBD の上流工程で発見することが可能である。

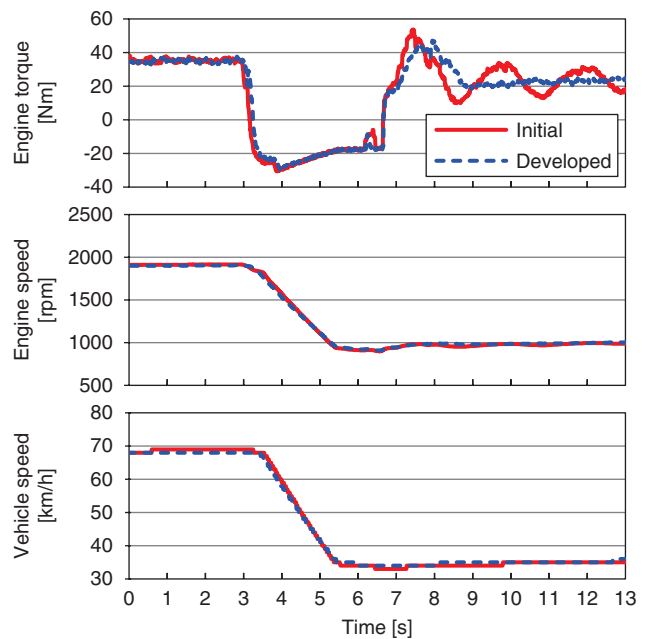


Fig. 12 Behavior of developed controller

6. まとめ

パワープラント系制御開発において、MBD の上流工程における仮想車両テストの評価条件と最終工程における実車両テストの評価条件との差により生じていた、開発手戻りと開発のフロントローディングの課題を低減することを目的に、以下をおこなった。

- (1) MBD の上流工程に、さまざまな運転状況におけるドライバの臨機応変な操作による評価を取り入れた。
- (2) ドライバの臨機応変な操作を得る手段として、パワープラント系の制御開発に主眼をおいたドライビングシミュレータ環境を構築した。
- (3) 構築したドライビングシミュレータ環境が、MBD の精度向上に役立つことを確認した。

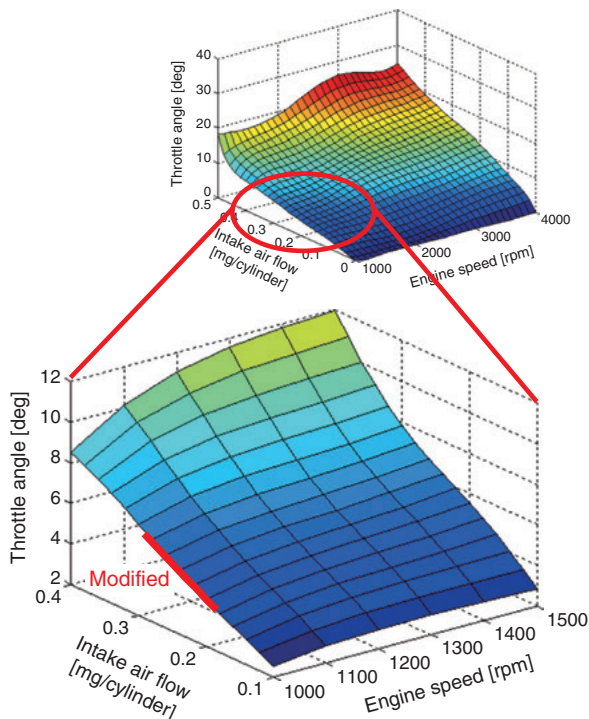


Fig. 11 Modified response surface model

参考文献

- (1) 藤本茂希, 大高義行, 小堂智史: MBD 実現に向けたエンジンプラントモデルと段階的システム同定環境の構築, Honda R&D Technical Review, Vol. 24, No. 2, p. 120-127
- (2) Dagci, O., Pereira, N., Cherry, J.: Maneuver-Based Battery-in-the-Loop Testing - Bringing Reality to Lab, SAE Int. J. Alt. Power, No. 2013-01-0157(2013)
- (3) 中川真仁, 安信誠二: 動的障害物回避に注目した電動四輪車の知的自動運転システム, ファジィシステムシンポジウム講演論文集 (CD-ROM), 21 巻, p. 9D4-3(2005)
- (4) 堀井泰聡, 土居俊一: 夜間運転時における歩行者視認性と運転行動の解析, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 17, p. 103-108(2012)
- (5) 轟章: 応答曲面法による非線形問題の最適設計入門, 日本機械学会講習会 (No. 99-73), p. 11-24(1999)

■ 著 者 ■



小堂 智 史



藤本 茂 希



小野 高 志



鈴木 哲 也