

多機能シミュレータによる車両運動の定量評価に関する研究*¹

Quantification of Vehicle Dynamics by Means of Development of a Multipurpose Simulator

岡田光太郎 K. OKADA マローニアン・アリス A. MAROONIAN 澤田直規 N. SAWADA
川原禎弘 S. KAWAHARA 中野史郎 S. NAKANO

In pursuit of constantly improving the development of the vehicle system and controls by means of quantification of performance for the improvement of vehicle dynamics, we have developed a new simulator. The Dynamic Motion Simulator (DMS) is composed of a modular chassis mounted on five distinct Stewart platform Motion Bases (MB) controlled by real-time models. The chassis integrates mass-produced and prototype systems such as steering, suspension and driveline units along with its own electronic control unit. This paper describes the concept, realization and planned activities as well as report on the new possibilities of using the developed simulator as a research and development tool.

Key Words: vehicle development, hardware in the loop simulation, design optimization, vehicle dynamics

1. はじめに

現在の車両開発では、構成するシステムへの要求仕様に基づき個別のシステム開発を実施し、そのシステムを車両に搭載して評価を行うことが多い。このような開発は操舵系や駆動系などシステムごとに各々独立して実施されているため、車両に搭載し評価する段階で車両としての要求特性との差が判明し、システム改良のため多大な開発時間を費やす必要がある。また、個々のシステムを構成する要素部品の性能は向上している一方、要素によるシステムへの影響の定量化手法が確立されていないので、システム全体の性能としては向上しない可能性がある。この課題の解決を目指し、Hardware-in-the-Loop (HIL) シミュレータなどのテストベンチでの予測評価やコンピュータシミュレーションによる開発が広く行われてきた^{1)~3)}。

以上の問題を踏まえ、自動車のシステム開発には、システムへの要求仕様を満たすために必要な設計手法の確立と、複数システムを搭載した状態での台上評価が必要であると考え、本報では、操舵系、駆動系システムの開発プロセスの改良を目指し開発した Dynamic Motion Simulator (DMS) について、構造と制御につ

いて概説する。また、操舵系の機能におけるサスペンションリンケージの影響について DMS を活用して解析した事例について述べる。

2. 自動車開発におけるシミュレータの活用

シミュレータ、台上評価試験は自動車開発プロセスで広く活用されており、要素、システムにとどまらず、車両全体でさえ実施されている。たとえば、エネルギー消費、車両重量の軽減、コスト低減などの分野では、開発の初期段階でシミュレーションが活用されている。2.1 では、操舵系、駆動系開発のシミュレータと台上評価の活用の概要を示し、2.2 では、DMS の開発目的に述べる。

2.1 既存シミュレータと台上評価試験の概要

操舵系、駆動系の開発初期段階では、Model-In-the-Loop (MIL) シミュレーション^{4), 5)} を活用し、モデル上で機能検証を実施する。その後、ソフトウェアを実装した Software-In-the-Loop (SIL) シミュレーションを活用し、モデル上で、機械部品やシステム制御アルゴリズムの設計を検証する。

台上評価試験では、まず要素部品レベルで静的・動的応答、剛性、摩擦特性などの計測を行う。その後、サブ

* 1 本論文は自動車技術会 学術講演会前刷集 No. 148-14, 文献番号 20145814 (2014) を基に作成した。

システムレベルでの計測を実施する。操舵系ではパワーコラム、駆動系ではカップリングユニットが挙げられる。

開発の次の段階では、HIL シミュレータやシステムベンチを活用し、システム性能を検証する。制御パラメータの事前調整やステアリングの機械的特性のチューニングも実施される。図1に示す操舵系評価用 HIL シミュレータは、運転者と路面からの入力をステアリングホイールとタイロッドに設置したアクチュエータで模擬し、主にアシストモータ制御の開発に活用される。活用例としては、電動パワーステアリングのアクティブ摩擦補償の開発⁶⁾が挙げられる。駆動系評価用シミュレータは入力モータと負荷モータで構成され、駆動力配分の解析等に活用されている。

開発の最終段階では、開発したシステムを車両に搭載し、試験運転者が実車走行にて車両性能を評価し、各特性の最終的な決定をする。

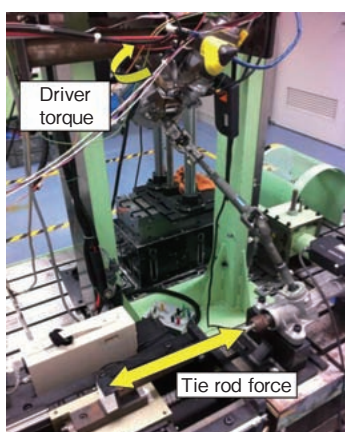


図1 操舵系 HIL シミュレータ
Steering HIL simulator

2.2 DMS の開発目的

シミュレータを活用し操舵系、駆動系の要素開発や制御開発が実施されてきたが、取り付けるシャシに関する情報不足やモデル化されていない要素の影響から、台上評価試験での特性と実車評価試験での結果とは大きな差がみられる。この差を埋めることを目的として、テストベンチ上でシャシなどのシステム周辺要素や、マウントブッシュなどのモデル化されていない要素を含んだ状態で評価方法の確立を目指し DMS を開発した。開発システムと周辺環境との相互作用を把握することで、車両運動や音振性能など複数の要求を満足する設計や制御の構築が可能になる。

3. DMS の特徴

図2に DMS の概略を示す。5 台のスチュワートプラットフォームタイプのモーションベース (MB) で構成され、各々の MB は 6 自由度の運動 (x, y, z 方向の並進運動、ロール、ピッチ、ヨーの回転運動) が可能である。シャシは中央に配置された車体 MB に固定され、車体の動きを与えることができる。その他の 4 台の車輪 MB は車輪の下に配置され、路面からの入力に相当する力を供給できる。また、車輪 MB 上に設置されたモータを車軸に連結することで、駆動系に負荷を与えることができ、駆動系 HIL 試験が実施できる。

DMS の動作の制御には、車両 RT (Real Time) モードとダイレクト制御モードの 2 種類のモードを備えている。車両 RT モードでは、実車走行試験や外付けのジョイスティックコントローラなどでの運転者の操舵とペダル操作を入力し、リアルタイム車両モデルで演算された結果から、MB や開発システムのアクチュエータへの指令を決定する。MB や車両にセンサを設置しコントローラにフィードバックすることで、車両運動のシミュレーションを動的に表現できる。ダイレクト制御モードでは、実車試験結果や事前に定義した入力パターン (ステップ、ランプ、正弦波スイープ信号) を指令値とすることで、システムの性能評価を実施することができる。

MB の制御を開ループ位置制御とし、閉ループの車両運動に組み合わせることで、MB とシャシ、駆動系の過剰拘束を防いでいる。運転者の操舵は、モータを設置し角度またはトルク制御にて入力する。駆動輪は、トルクセンサを介して角度またはトルク制御された負荷モータに連結される。DMS は実車環境のような統合環境をもつため、操舵系、駆動系の開発要素とシャシ間の機械的相互作用を表現することができる。

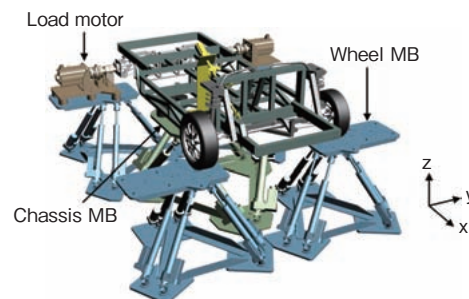


図2 DMS 概略図
Outline view of DMS

4. DMS を活用したシステム評価

サスペンションリンケージが操舵系に与える変位と力の影響把握のため、ホイールアライメントとタイロッド軸力について DMS を活用し、解析した結果を紹介する。

4.1 ホイールアライメント変化に与える影響

ホイールアライメントは、サスペンションジオメトリやリンケージの固定点座標によって決定する。本報では、マクファーソンストラット式のサスペンションを対象として、ホイールを上下運動（バンブ運動）させた際のホイールアライメントについて DMS での計測結果と机上シミュレーションの結果を比較する。机上シミュレーションは機構解析ソフトにて実施し、リンク部はリジッドジョイントモデルとして扱った。また、ホイールアライメントとして、キャンバー角、カスター角、トー角に着目した。

図3はカスター角、図4はキャンバー角、図5はトー角の DMS での計測結果と机上シミュレーションの比較である。カスター角では比較的良好な相関がみられるが、キャンバー角、トー角では有意な差がみられる。この差は、シミュレーションではリジッドジョイントモデルとして扱っているリンク部が、実際にはブシュの弾性変形による変位を伴っているためである。本結果より、シミュレーションにて、実際のアライメント特性を精度良く予測するためには、ブシュなどの弾性要素の特性を含める必要がある。しかし、このような部品は非線形特性を含み正確に定量化することが難しい。

DMS を活用することで、非線形特性をもつ要素を含んだシステムの実機のホイールアライメント変化を正確に計測することができるため、効率的な開発が可能となる。

4.2 タイロッド軸力変化に与える影響

車両運動に大きく影響するタイヤ力はサスペンション、シャシ、ステアリングを通して運転者に伝達される。サスペンションとステアリングの機械的な連結点であるタイロッド外側のボールジョイントを操舵系への路面からの入力点と見なすことができる。タイヤ力のステアリング系への伝達を把握するため、車体 MB と車輪 MB 間の相対位置を変化させてタイヤ力に変動を与えた場合のタイロッド軸力を計測した。

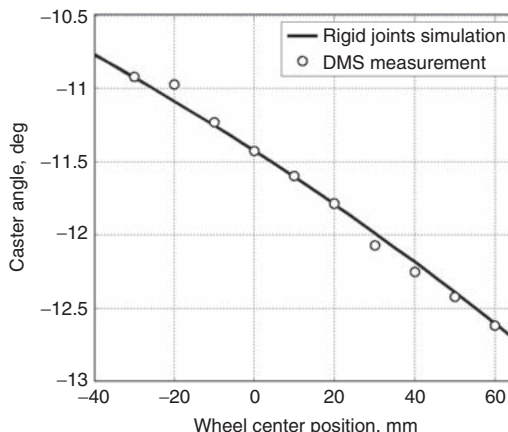


図3 バンブ運動におけるカスター角
Caster angle with bump movement

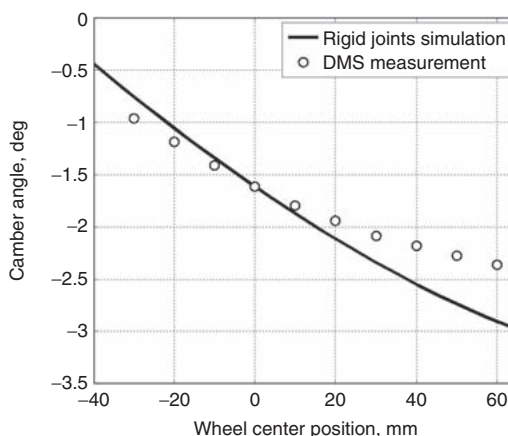


図4 バンブ運動におけるキャンバー角
Camber angle with bump movement

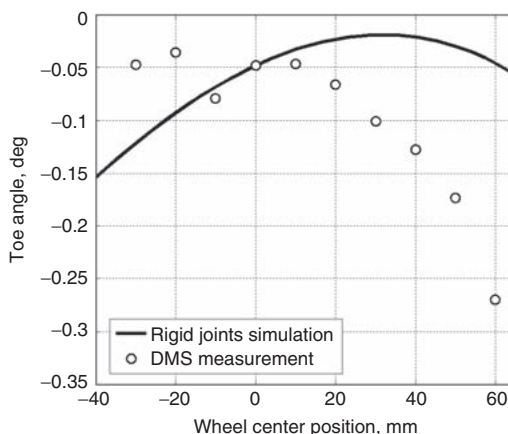


図5 バンブ運動におけるトー角
Toe angle with bump movement

タイロッド軸力に着目し、静特性および動特性試験を実施した。静特性試験では、車体 MB を固定し車輪（左前輪）MB をある初期状態から x, y, z 方向の各々に正負同値のオフセットを変化させた。動特性試験では、車体 MB を固定し車輪（左前輪）MB を x, y, z 方向の各々に静特性試験と同等のオフセット値を振幅とする 1Hz の正弦波の位置変化を与えた。タイヤの接地面で発生する力がタイロッド軸力へ与える影響に着目するため、タイロッドの内側ボールジョイントの位置と車輪の回転を機械的に拘束した。以下にその結果を示す。

まず静特性試験の結果を示す。図6より x 方向の相対位置変化時のタイロッド軸力変化はヒステリシスが大きく、非線形である。これはダンパー、ボールジョイントの摩擦とロアアームマウントブッシュの摩擦、ひずみなどが原因であると考えられる。一方、図7より y 方向の変化に対し、タイロッド軸力変化はヒステリシスが小さく、高剛性な特性を示す。図8より z 方向の変化に対しタイロッド軸力の変化は小さい。この結果より、評価したシステムでは、バンプ運動による軸力変化の小さいサスペンションであることを意味している。

次に動特性試験の結果を示す。車輪 MB を x, y, z 方向の各々に 1Hz で位置変化させた際のタイロッド軸力変化を図9、図10、図11に示す。x 方向の変化は、y 方向の変化と比較して極値付近で摩擦の影響と考えられる波形の変化が見られる。z 方向の変化では、静特性試験と同様に、タイロッド軸力変化が小さいことが分かる。

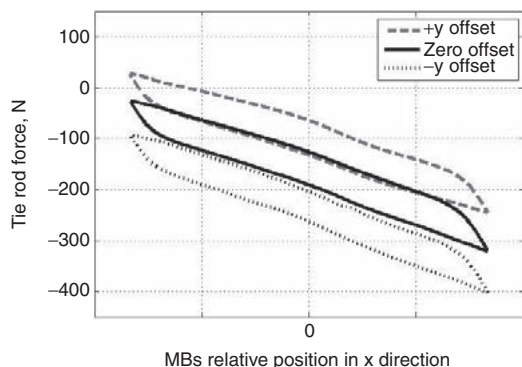


図6 x 方向相対位置変化時の左タイロッド軸力
Left tie rod force versus MB relative position in x direction

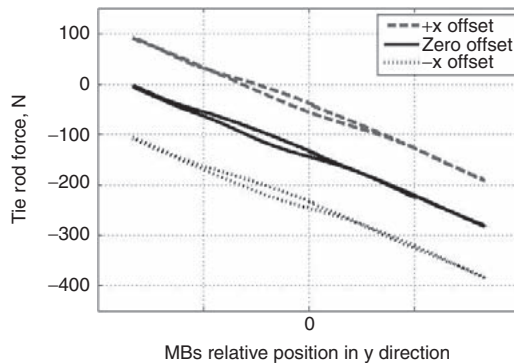


図7 y 方向相対位置変化時の左タイロッド軸力
Left tie rod force versus MB relative position in y direction

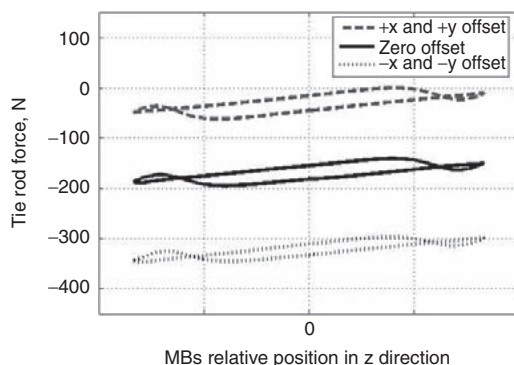


図8 z 方向相対位置変化時の左タイロッド軸力
Left tie rod force versus MB relative position in z direction

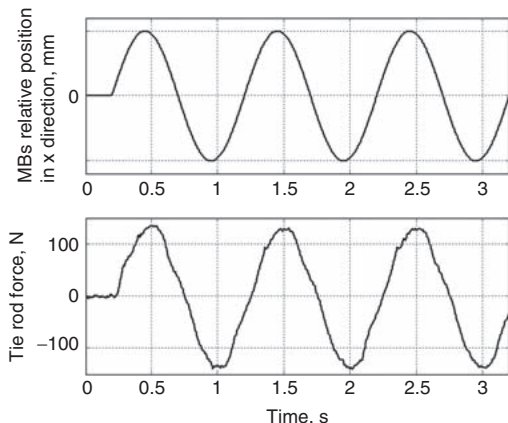


図9 x 方向正弦波位置指令時の左タイロッド軸力
Left tie rod force to x direction sine position command

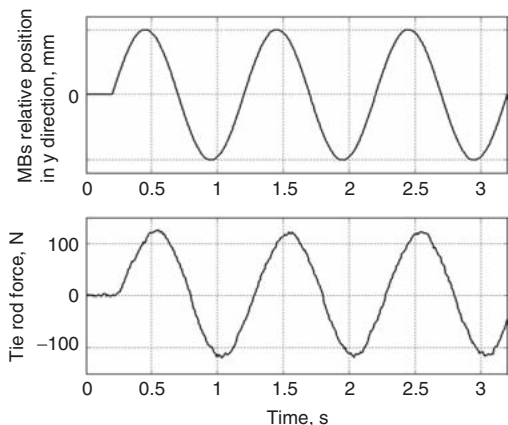


図10 y方向正弦波位置指令時の左タイロッド軸力
Left tie rod force to y direction sine position command

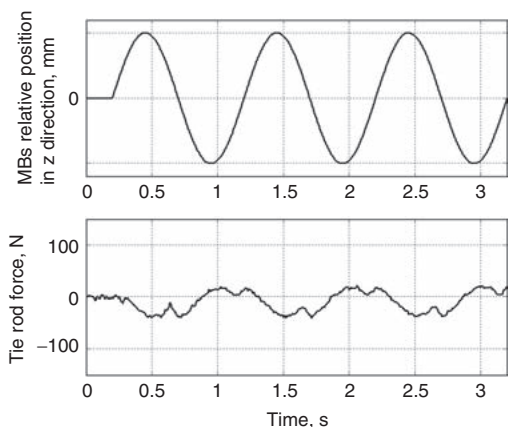


図11 z方向正弦波位置指令時の左タイロッド軸力
Left tie rod force to z direction sine position command

5. おわりに

本報では、自動車に搭載されるシステムの開発プロセス改善を目指し開発したDMSについて紹介した。DMSを活用し、ブシュなどの正確なモデル化が難しい要素を含んだシステムについて解析した事例を示した。

実車走行では評価が難しい特性やモデル化の困難な要素を含んだ開発システムの評価を、実車の走行状態を台上で模擬できるDMSを用いて高い精度で実現した。今後、DMSを活用し、操舵系、駆動系をはじめとする複数システムの相互作用について解析することを目指す。DMSにより車両の開発時間削減と性能向上の両立に貢献したい。

参考文献

1) A. Andersson, P. Nyberg, H. Sehammar, P. Öberg: Vehicle Powertrain Test Bench Co-Simulation with

a Moving Base Simulator Using a Pedal Robot, SAE Int. J. Passeng. Cars-Electron. Electr. Syst. vol. 6, no. 1 (2013) p. 169-179.

2) P. Waeltermann, T. Michalsky, J. Held: Hardware-in-the-Loop Testinf in Racing Applications, SAE Technical Paper 2004-01-3502 (2004).
3) M. Segawa, S. Nakano, M. Shino, M. Nagai: Preliminary Study Concerning Quantitative Analysis of Steering System Using Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulator, SAE Technical Paper 2006-01-1186 (2006).
4) A. Marronian, T. Tamura, R. Fuchs: Modeling and Simulation for the Dynamic Analysis of an Electronically Controlled Torque Coupling, Advances in Automotive Control, 7, 1 (2013).
5) T. Tamura, A. Maroonian, M. Higashi, R. Fuchs: Modeling and Simulation for the Dynamic Analysis of an Electric Power Steering, chassis.tech plus (2012).
6) T. Tamura, A. Maroonian, R. Fuchs: Active Compensation of Friction in Electric Power Steering, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Lecture Notes in Electrical Engineering Volume 198 (2013), p. 213-225.

筆者



岡田光太郎*
K. OKADA



マローニアン・アリス*
A. MAROONIAN



澤田直規**
N. SAWADA



川原禎弘*
S. KAWAHARA



中野史郎***
S. NAKANO

* 研究開発本部 先進技術創生研究部
** 研究開発本部 先端基盤研究部
*** シニアフェロー 博士 (情報学)