

Chassis control simulation processes

Mechanical Simulation の CarSim を使って、GM の技術者達は試作車が完成する遥か前にラボ試験を実施

RIC MOUSSEAU 氏 (ゼネラルモーターズ社 性能試験担当)

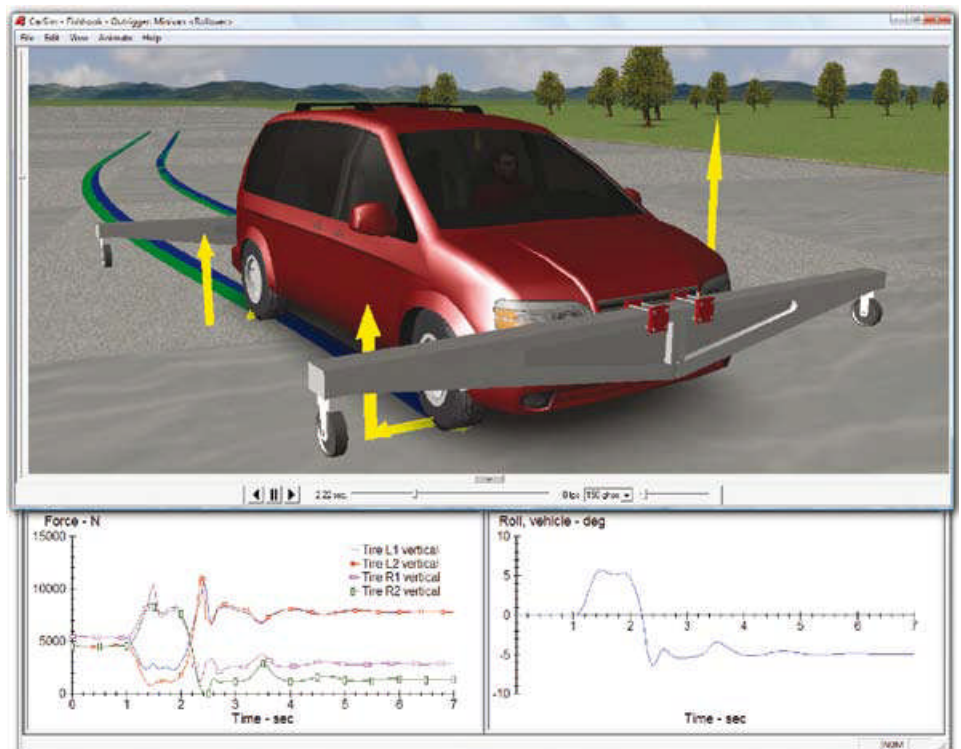
■ 全ての車のシャシー制御システムが「安全、信頼、違和感無く」機能するように、General Motors の Milford テストコース (Milford Proving Ground ; MPG) と各遠隔の冬季テストコースでは、大規模な車両試験を行っています。これには「制動、加速、旋回、それらの組み合わせ」走行時の、「ABS、トラクション制御、ESC (Electronic Stability Control)」の性能を計測する車両テストが含まれます。これらの実車テストは、「ドライ、ウェット、スノー、アイス」の各路面で実施します。他のテストに、ESC 性能を計測する「FMVSS-126 正弦波デュエル (SWD)」走行と、過激な緊急車線変更時のタイヤの浮き上がり (tire liftoff)

を定量化する「NHTSAフィッシュフック試験 (fishhook test)」があります。GM は、この高度な試験の為に、「施設、装置、人的資源、教育訓練」に多額の投資を行いました。

GMでは、車の安全性と性能を最大化しつつ、試験車両のコスト低減のあらゆる可能性を検討しました。車両運動シミュレーションの能力は、実車試験の一部を置き換えられる信頼レベルに達しています。世界に散らばる GM の複数の施設で、技術者が Mechanical Simulation の「CarSim」と呼ばれる製品を広範囲に渡る車両開発と試験業務に使っています。シミュレーションが、「コスト低減、品質改善、開発期間短縮」の機会を提供します。車両走行はラボに置かれたコンピュータが実行し、技術者達は試験車両が完成する数ヶ月も前にシステム性能を評価する事が出来ます。

シミュレーションでは、テストの度に高価なデータ収録装置を搭載しないので、実車テストよりもコスト安になります。最後に、動力学シミュレーションが生成する試験レポートを、テストコースでの実車テストと同じ形にする事が出来ます。GM の車両開発技術者に馴染み深い、このテストレポート形式が、

CarSim GUI とシミュレーションのアニメーション画面の例

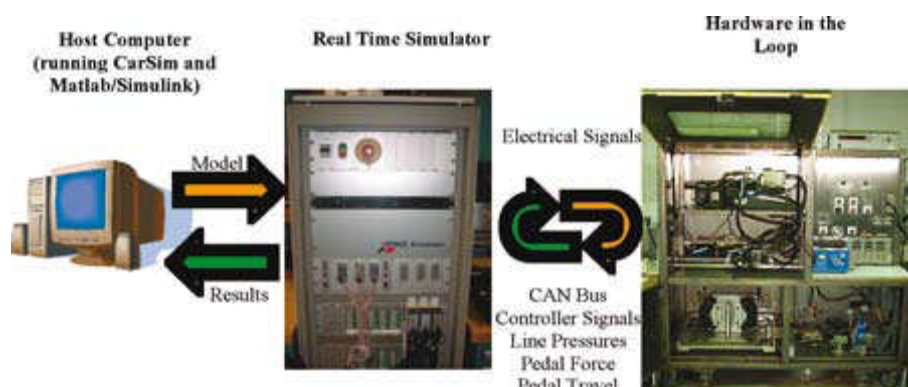


シミュレーション・モデルの有効性確認を容易にします。

「Hardware-in-the-loop (HIL)」を GM の MPG 技術者が広範囲に利用して、シャシー制御のシステム統合化を図っています。HIL の基本的な考えは、高い信頼度でモデル化出来る車両部分にはシミュレーションを利用し、リアルタイム・ソフトによるモデル化が難しい部分を実際の車両部品を使う事です。例えばABS の HIL シミュレーションのハードウェアには、バキューム・アシストとマスター・シリンダを装着した実際の基本ブレーキ装置の「ブレーキ制御装置と調節装置」が入る事があります。この装置は、油圧装置の性能が複雑な非線形温度依存性を持つ為に、ソフトウェアによるモデル化が困難です。しかし残りの車両部分は信頼性の高いモデル化が出来るので、シミュレーションに適しています。この例は油圧装置が入るので、「ウェット・ベンチ (wet bench)」と呼ばれます。別の方法として、基本ブレーキ装置だけをモデル化し、ブレーキ調節装置をソフトで実現する事例は「ドライベンチ (dry bench)」と呼ばれます。

GM MPG が「ウェット・ベンチ」を最も良く使うのは、物理テストに近い結果が得られるからです。HIL

システムの構成は、「CarSim-RT 車両動力学シミュレーションプログラム、ブレーキ・バック (brake buck)、リアルタイム・コンピュータ」です。データ入力とプログラムの実行をコントロールする CarSim GUI は、ホスト機に駐在します。車両動力学シミュレーションを実行する CarSim ソルバーは、リアルタイム・シミュレータに在中します。図に、「計測ライン圧、CANbus メッセージ、ブレーキ・バック (brake buck) とシミュレータ間の各種信号」が授受される様子を示します。



HIL シミュレーションと信号の流れ

「CarSimは GM の開発環境と同じデータ形式なので、車両性能シミュレーションに理想的です」

CarSim のデータ仕様が GM の車両開発環境と互換性があるので、理想的に車両性能シミュレーションに適しています。車両モデルには「10自由度 (DOF)」あり、そのうち「6 自由度」でばね上質量の位置と姿勢角を定義し、残りの「4 自由度」でばね下質量のジャウンス位置を定義します。それ以外にも、各タイヤの回転、操舵系の回転、ブレーキ系の各自由度があります。

サスペンションのトー角やキャンバ角等の、ばね下質量の他の動きは、拘束条件式を使って定義します。CarSim モデルは、特性定数と多次元参照表 (lookup table) の組み合わせで定義します。通常は、車両設計データや車両全体および/または各部品の計測データを使用します。車両データには、「ばね上質量、重心位置、ロール・ピッチ・ヨー慣性モーメント、ショックアブソーバの力・速度データ、サスペンションのキネマティクスとコンプライアンス」等が含まれます。その他の重要なパラメータに、「荷重、スリップ、キャンバ角」毎に計測する「タイヤ力とモーメント・データ」があります。これらの全データが、GM の社内データベースに格納されて CarSim のデータ構造と連動するので、車両のモデル化を効率的に行う事が出来ます。世界の別地域の GM 技術者は、この共通データベースから CarSim にデータをインポートして、シミュレーションを実施出来ます。車両運動モデルを標準操安テストで確認すると、HIL シミュレータに統合する準備が整います。

ブレーキ・バック (brake buck) には、「バキューム・アシスト、マスター・シリンダ、ロータ、キャリパー、配管長」等のブレーキ部品が全て含まれます。油圧アクチュエータがペダル踏力を模擬して、マスター・シリンダの入力ロードに力を加えます。ロータは当然ながら回転しませんが、ブレーキ・コン

プライアンスを表現する重要要素です。圧力変換器が、各輪のブレーキ・キャリパ圧を計測します。信号が CarSimのブレーキモデルに送り返されて、表を使ってブレーキ・トルクの推定値に換算されます。ブレーキ・バックに付属する「ブレーキ制御 ECU」が、ブレーキ圧調整装置をコントロールします。実際の車のように、ブレーキ・フルードから性能を低下させるエアを抜きます。

リアルタイム・コンピュータがリアルタイムで CarSim モデルを実行し、ブレーキ・バックとやり取りします。ブレーキのライン圧のアナログ信号をデジタル化して、車両モデルのブレーキ・トルクを推定します。リアルタイム・シミュレータは、ブレーキ ECU への CANbus 信号と、重要な車両センサ群のデジタル I/O のやり取りを行います。また、ECU が正常に機能するように、診断メッセージ (diagnostic messages) も送り出します。

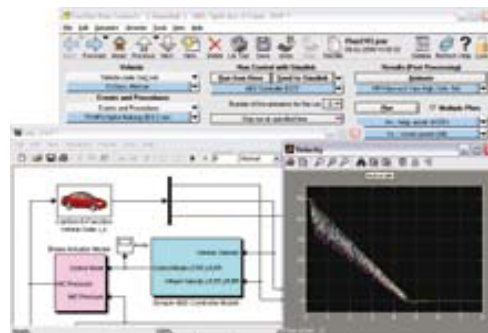
シミュレーション走行の多くがブレーキを使用し、スロットルは殆ど使用しません。この種類の走行に CarSim のパワートレイン・モデルは適していますが、トラクション・コントロールが有効な走行では、CarSim シミュレーションと並列に別のプロセッサで実行する、Simulink で開発した詳細なパワートレイン・モデルが必要になります。

GM MPG の HIL に良く使われる車両運動シミュレーションが、「MVSS-126 正弦波デュエル試験走行 (Sine with Dwell (SWD) test maneuver)」です。この走行は非常に激しく、ESC を搭載する全ての車がオーバーステア挙動を示します。2011年にレギュレーションが完全実施されると、米国内で販売されるGVWR が「4,545kg (10,000 lb)」以下の車は、全てこのテストに合格する必要があります。このテストでは、わずかな例外を除いて ESC を搭載しない車はコントロールを失ってスピニアウトします。

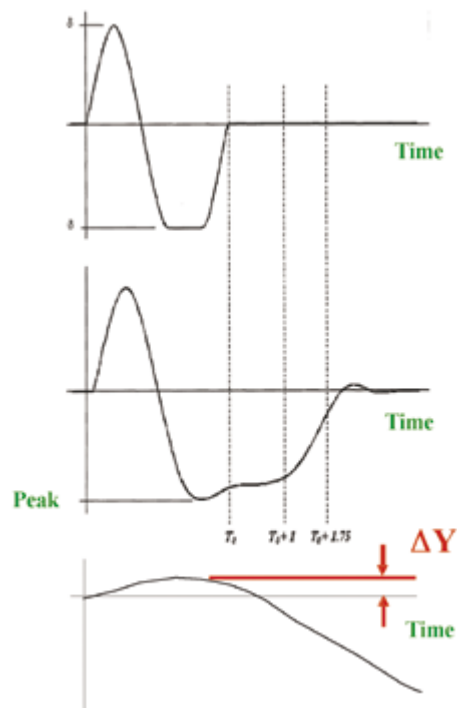
「FMVSS 126 レギュレーション」の「SWD 操舵プロファイル」は、図のように 0.7 Hz 正弦波の 3/4 部分に時刻1.07秒の「0.5 sec 間のデュエル」が付いた形をしています。これに正弦波の最後の「1/4」を付けてプロファイルを終了します。ステアリング・プロファイルが非対称形なので、ステア角が大きくなると車がスピンしやすくなります。

「SWD テスト」では、ランプ操舵試験の横加速度が「0.3g」に相当する計測操舵角を「基準操舵角」とする乗数で比例換算したプロファイルで車を操舵します。試験は、操舵乗数 (steering multiplication factor) 「1.5」で始まり、「操舵振幅が基準操舵角の6.5倍」を越すか「操舵角が270度」に達すると終わります。試験データから求める指標 (metrics) には、「1.0秒後と1.75秒後のヨーレート比 (yaw rate ratios) (車両スピン計測)」と「操舵サイクルの「3/4」サイクルにおける側方変位 (車両走破性計測値)」があります。「FMVSS-126 レギュレーション」では、走行時の最低側方変位が「1.83 m」で、「1.0 sec のヨーレート」が走行ピーク値の「35%以下」、「1.75 sec のヨーレート」がピークの「20%以下」に収まる必要があります。

テスト指標が (test metric) が、開発車両とテスト路面に影響される大きさを理解する事が検定の重要部分になります。車両操縦性テスト指標 (vehicle handling test metric) を支配するモデル・パラメータに、



Simulink 画面の例



SWD 操舵プロファイルと評価指標

「タイヤのコーナリング特性、荷重配分、サスペンション剛性とダンピング、テスト入力車速」があります。

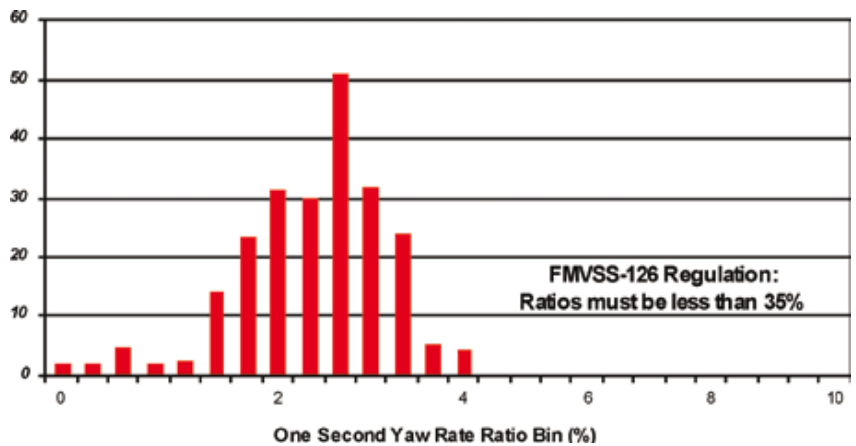
CarSim HIL シミュレーションを使って、車両パラメータをランダムに変化させるモンテカルロ法が、車両制御システムのロバスト分析に有効である事が分かっています。この分析では通常、1,000回以上の「HIL シミュレーション」を実行し、24 時間前後で終わります。

結果をヒストグラム・グラフに描くと、「1.0 秒ヨーレート」と「側方変位」要件への変数の影響が理解出来ます。ばらつきはありますが、ヨーレート比は常に「35% 限界」よりも小さく、側方変位は常に「1.83m」要件を余裕で上まっています。これらのテストから、制御システムがレギュレーションを満たしてロバストである事が証明されます。

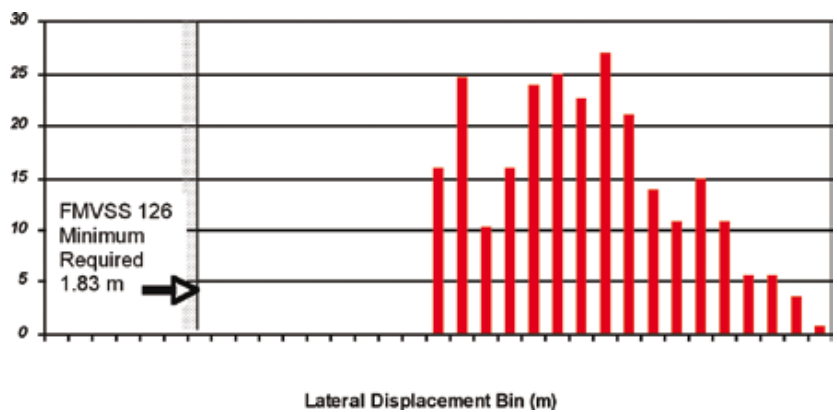
シミュレーション環境で、これらの試験を実施出来るので、車両開発の基礎としての **CarSim** 等の車両動力学の価値が理解

出来ます。**CarSim** は、車両開発工程

に上手く適合し、実車テストを補完するものです。HIL シミュレーションは、大量な計算を必要とする車両試験が必要な広範囲のロバストネス検討に極めて有効なツールである事が示されてきました。また **CarSim** は、実車試験による再現が難しい問題を切り出したり、テストで問題になる車両形態を特定したりするのにも使われています。以上まとめて、HILシミュレーションは車両性能試験を最適化する強力なツールであり、コストを抑えて品質を改善出来る事を見ました。



「1.0 秒ヨーレート比」の棒グラフ



「横移動距離」の棒グラフ

Contact Ric Mousseau or Tom Klingler, GM Proving Ground
 Email: cedric.mousseau@gm.com
 Email: thomas.klingler@gm.com
 Web: www.carsim.com