



Virtual Bus

HIL 統合テストによるバス用新型 E/E アーキテクチャの
完成度の検証 (EvoBus 社 / MBtech グループ)



連結式やダブルデッカー、車高ダウン、最大4基の両開きドアなどの広範囲の快適／安全システム、市街バスや観光バスなどバスの種類や搭載されている機能はさまざまです。この多様性はHILテストベンチの設計にも例外なくさまざまなバリエーションに対応可能で、すばやく切り換えができることが求められます。EvoBus社、MBtechグループ、dSPACEの3社は共同で、この要件を満たす試験システムをECUの妥当性確認のために構築しました。

バスおよびコーチ（長距離バス）のトップメーカーである EvoBus 社は、常にお客様が求める製品の提供を目指し、最高の品質を絶対条件としています。市場においてはバス車両には最大限の稼働率と長期の耐用年数が求められます。短期間の開発で革新的な製品を十分に実証されたシステムとしてマーケットへ投入するには、仕様決定から発売までを含む統合的開発プロセスと、徹底的なテストを構成するテストチェーンが不可欠です。乗用バスに搭載される機械的、流体的（空圧／油圧）、電気的システムは、制御のために電気／電子（E/E）セントラルアーキテクチャを介して接続されます。そしてこれら多様なシステムの車両全体ネットワークへの統合においては、その妥当性を確認する必要があるため、HIL テストが開発プロセスの主要部となります。これに加えてテストの自動化が開発効率をさらに大きく改善します。最新のバス／コーチのアーキテクチャには、広範囲の要求をひとつにまとめ上げ

る能力が求められます。たとえば市街バスの高度な連結制御システムは、ブレーキやエンジンをはじめとして、いわゆる「ニーリング」用の車高調整装置や各種の補助システム／装置と相互に作用する必要があります。また観光バスにおいては、乗客が娯楽や広範な観光情報を自由に選択して楽しめるようなマルチメディアシステムがこれに含まれます。これらの極めて多様な機能と情報ソースは、複数のシステムにわたって作用するため、それらを 1 つのネットワーク内で円滑に機能させる必要があります。開発者は、システムが車両に搭載される以前の極めて早い開発段階でこれを確かめねばならず、これはテスト環境とテスト戦略に対して困難な要求を突きつけます。

テスト環境とテストの焦点

コンポーネントレベルおよびネットワークレベルで制御ロジックと診断機能のテストを行うために、HIL（Hardware-in-the-Loop）シミュレータが構築されました。

HIL シミュレーションでは、バス固有システムのテストと、各種コンポーネント間の相互作用のテストが特に重視されます。製造グループの他のセクションから入手可能なコンポーネントが、可能な限りシミュレーションに再利用されます。さらに HIL テスト用シミュレーションモデルなどのソフトウェアパーツにも、他のテストベンチからのコピーが流用されます。全般的なテストケースライブラリとテスト仕様は EvoBus 社からの要求に従って調整されました。

多様性への対応

多様なシステムと機能の統合はバス／コーチ開発における困難な課題のひとつです。さらにお客様から要求されるさまざまな特注機能がこれに加わります。これらへ対処するために、ソフトウェアモジュール開発期間の短縮が求められます。初期仕様決定からお客様の車両へ装着するまでの開発とテストに与えられた期間は、たったの数週間しかありませんでした。



図 1：EvoBus 社の標準開発プロセスに組み込まれた HIL シミュレーション



しかも EvoBus 社の E/E アーキテクチャは、欧州向けのすべてのバス/コーチへ統一的に適用される「コンストラクションキット」であるため、装備の少ないバスをはじめハイエンドのダブルデッカー観光バスや、全長 20 m におよぶ連結式の市街バスを含むすべての車両アーキテクチャの作成に使用されます。このような多様性は ECU のパラメータ設定量とバリエーション数を増加させ、さらにトランスミッションのタイプが異なる場合などには、時によってまったく別の ECU を必要とします。

このような状況においては、HIL テストベ

ンチに、ネットワーク化と診断機能の能力を検証するために社内コンポーネントテストを追加実施します。それらの試験の詳細は、システムの完成度とテスト対象となるソフトウェアセクションによって異なります。統合テストは複数のシステムにわたって作用する制御ロジックの検証を主な目的とします。

テストシステムとテスト運営に対する要件

テストを円滑に運営するには、信頼できるハードウェアと問題発生時の迅速なサポートが基本的な前提条件となります。

「HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレーションを開発プロセスの早期で使用するにより、ECU の高い完成度とその確証が早い段階で得られます」

Ian Suckow 氏, EvoBus GmbH

ンチ上でさまざまな車両バリエーションをすばやく切り換えられるようにする必要があるので、モデル、ECU ネットワーク、パラメータ設定に高い柔軟性が求められます。

HIL 統合テストの目的

高い品質を達成するために、EvoBus 社は自社の電気/電子システムと診断機能の開発プロセスを、CMMI プロセスモデルに基づいて構築しました。これはすなわち、最適化された標準プロセスに従ってプロジェクトを実行するとともに、継続的にそのプロセスを改善することを意味します。その改善策のひとつが、V 字開発サイクルの右側の分岐に位置する統合テストチェーンです (図 1)。このプロセスでは、ECU と ECU ソフトウェアのテストは可能な限りサブライヤによって実施され、EvoBus 社はサブライヤマネージメントシステムによってそれらを調整/管理します。同社は、総合的統合テストベンチ上で統合テストを開始

する前に、ネットワーク化と診断機能の能力を検証するために社内コンポーネントテストを追加実施します。それらの試験の詳細は、システムの完成度とテスト対象となるソフトウェアセクションによって異なります。統合テストは複数のシステムにわたって作用する制御ロジックの検証を主な目的とします。

テストシステムには追加の要求や新たなシステムへ対応するための柔軟な拡張性が求められます。EvoBus 社はテストベンチのセットアップから、保守、モデリング、テストの構築と実施までを含むすべてのテスト業務を、主幹のオペレータ/パートナーへ委託することを決断しました。このパートナーは HIL システムの正常な動作に対して責任を持ちます。EvoBus 社はテスト仕様を提示し、テスト結果の評価は HIL テスト実施者と機能開発者が共同で行います。dSPACE がコンポーネントの仕様作成と HIL テストシステムのセットアップを担当し、MBtech 社が実際のテスト運営とモデル作成を担当しました。このような複数拠点にまたがる開発プロセスでは、状況に応じた適任開発者が現場にいないという事態がたびたび発生してさらなる困難をまねきかねないため、手順の標準化、プロセスの明確な定義、シームレスな文書化、担当者間の密接なコミュニケーションが必要です。

HIL テストシステムの技術的構成

8 台の HIL シミュレータラックを使用することによって、機能および ECU をテストするための全システムの完全なネットワークが再現されました (図 2)。このシステムはパワートレイン、インテリア、シャシー領域を包括します。この総合的統合テストベンチは、EvoBus 社のすべての欧州統一バスをシミュレート可能です。このセットアップは 2 基のマルチプロセッサシステム—パワートレイン用の 4 台の dSPACE フルサイズシミュレータラック (5 基のプロセッサボードを搭載、環境モデルを計算) とインテリア用の 4 台のフルサイズシミュレータラック (4 基のプロセッサボードを搭載)—で構成されます。シャシー ECU のテストもこの 8 台のラックへ統合されました。これらのシミュレータは Gigalink 接続を介して通信します。計算負荷を複数のプロセッサで分担するために、環境モデルは分割可能とされ、各プロセッサノードへ割り当られます。全部で 2800 本のピンを持つ約 45 台の ECU が接続可能です。

現在は、車両インテリアのシミュレータにさらに 2 台のフルサイズラックを追加して、追加システムのシミュレーションが行えるようにシステムを拡張中です。この拡張が完了すると、市街バスや観光バスのモデル計算に最大で 10 基のプロセッサカーネルが使用できるようになります。

このシミュレータでは、バスのコンポーネントが実負荷としてシミュレーションへ組み込まれます。これらのコンポーネントはコンポーネントアセンブリを介してシミュレータへ接続されます。実負荷にはブレーキの空圧システム、照明システム、トランスミッションの部品、スロットル、エンジンのバルブなどが含まれます。HIL システムを円滑に運用するために、dSPACE は MBtech 社に対して HIL オペレータを派遣するとともに、包括的なハードウェアマニュアルを提供しました。

実負荷によるブレーキのシミュレーション

ブレーキシステムは、バス車両の 3 本の車軸に対応するためにセントラルモジュールとアスクルモジュールからなります。

各 ECU は 4 つの CAN バスを介して相互に接続されるとともに、車両安定化プログラム (ESP) へ接続されます。レストバスシミュレーションを行うために、すべての CAN 接続はスイッチマトリクスと dSPACE DS4302 CAN Interface Board を介して個別に切断可能とされます。リアルタイムでブレーキをシミュレートするために、実負荷アセンブリ (実際のバルブとセンサを備えたブレーキ空圧系統) がシミュレータへ接続され、結果としてブレーキシステム内の 32 個の圧力センサと 20 個のバルブのすべてがリアルタイムシミュレーションへ組み込まれました。空圧システム全体を実際にシミュレートしようとすると、大幅にコストが増加してしまいます。

パワートレインのシミュレート

EvoBus 社は自社のバス/コーチ用に 3 タイプのトランスミッション (トルクコン

バータ式オートマチック、セミオートマチック、マニュアル) を提供しています。これらのトランスミッションの ECU はコード化されたケーブルハーネスを介してシミュレータへ接続されます。これは、各 ECU をそれぞれの実負荷で動作させるにあたって、シミュレータ上には I/O リソースが 1 セットだけあれば十分であることを意味します。テストシステムにおけるトランスミッションタイプの変更は、2~3 の簡単な操作とシミュレーションモデルの交換だけで済みます。

インテリアとシャシーのコンポーネント

車両のインテリア機能用の ECU をテストするために、下記を含むすべてのバス固有コンポーネントがリアルタイムシミュレーションへ提供されました。

- 冷暖房システム (サブステーションの数は可変)

- ドア制御 (空圧式または電動式、数は可変)
- 電子制御式サスペンションのスプリングとダンパー
- 第 3 軸用の電子制御式油圧ステアリング機構
- 連結式バス用の連結角度制御
- 入出力が自由に設定可能な 6 つの MUX モジュール - アナログまたはデジタル信号 (連続信号またはパルス幅変調 (PWM))

合計で 1300 本の ECU ピンが車両インテリアシミュレータへ接続されました。そのうちの 672 本のピン上でセンサとアクチュエータのシミュレーションと、それらの電気的欠陥シミュレーションが可能で、これらのピンでは、電源およびその他のピンへの断線と短絡 (短絡抵抗は可変) が切り換えられます。



図 2 : HIL テストスタンドの全容 (8 台のフルサイズラックで構成されるシミュレータと、照明およびブレーキシステムのコンポーネントアセンブリ)

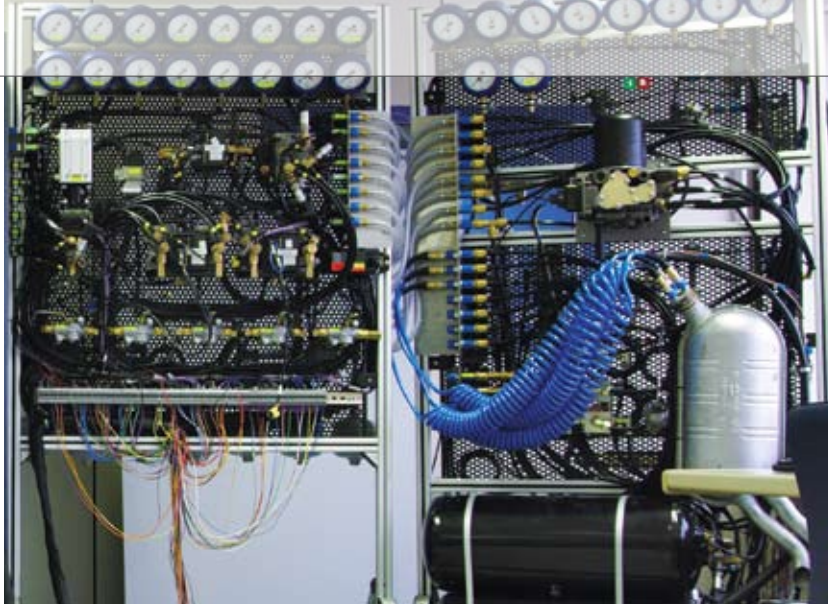


図3：ブレーキ空圧システムを実機のパルプを使用して再現

「サプライヤによるテスト、社内のコンポーネントテスト、車両テストなどの各種テストとHILテストを組み合わせることによって、徹底したテストが可能となり、プロトタイプテストに高いシステム完成度もたらされます」

Ian Suckow 氏、EvoBus GmbH

多様な機能を持たされる MUX モジュールの取り扱いには特に困難です。MUX モジュールはバス/コーチ用の特殊な ECU であり、多数の電装品を制御します（ルーフベンチレーション、電気システムマネージメント、ドア制御と車高調整（ニーリング）システムのサブファンクション、コーヒーマーカー、給湯ボイラーなど）。各モジュールは最大で 10 A の電流駆動能力を持ち、入力におけるトライステートまたはアナログレベルを評価します。欠陥シミュレーションでは、最大 50 A の欠陥電流をスイッチ可能な欠陥生成ユニット（FIU）が、シミュレータ上の MUX モジュールのピンへ接続されます。ECU トポロジは車両ごとに異なるため、MUX モジュールはスイッチマトリクスを介して異なる車両の CAN バスへ自動的に接続可能となっています。

バス環境モデルの特徴

包括的な機能テストと統合テストを適切なシミュレーション環境で行うには、環

境と被制御システムの現実的なモデル化が不可欠です。シミュレーションには車両サブシステムのすべて（パワートレイン、シャシー、インテリア）を含める必要があります。環境モデルの作成と保守は MBtech 社が担当し、テスト運営の途上で新たな制御ロジックが追加されました。市街バスの基本モデルは、車両の前方セクションと後方セクションに対応する 2 つの同一基本モデルで構成され、両セクションはジョイントで結合されます。このシャシーモデルでは連結角度制御、第 3 軸ステアリング機能、ニーリング（車高調整）機能などの制御ロジックが重要となります。これに対し観光バスのモデルは、単一セクションで構成される点で前者とは大きく異なります。

エンジンモデルは、走行抵抗、ステアリング、ブレーキ、エンジン発生トルクの特徴をシミュレートする個別のモデルで構成され、これらを合計することによって総合的な駆動トルクが求められます。ブレーキシステムは実負荷と実物の圧力回路で再現さ

用語解説

アクスルモジュレータ – 必要なブレーキ作動圧を車軸へ供給するために使用します。

CMMI (能力成熟度モデル統合) – 企業のソフトウェア開発能力（プロセスと改善活動）を体系的に評価する指標です。成熟レベル 3 は、プロジェクトが標準プロセスに沿って実行され、継続的で組織的なプロセス改善が行われていることを意味します。

MUX モジュール – 柔軟にプログラミング可能な ECU

トライステート – 「0」と「1」の 2 つの状態以外に、第 3 の状態として高インピーダンス状態を持つデジタルスイッチング素子

れるため、結果として得られる制動トルクと、環境モデル内のパワートレインモデルへの接続部だけが計算に必要となります。バス/コーチのドアは極めて多様なバリエーションを持ちます（空圧式、電動式など）。公共交通に用いるバスでは、ドア機能の可用性が特に重要となります。シミュレーションモデルには、冷暖房システム、各種スイッチ、降雨センサ、照度センサなども含まれます。

テストプロセス

テストの構築はリファレンスプロセス（PROVEtech:TP5）に基づきます。このプロセスは下記の 5 つのステップで構成されます。

- **テスト戦略の立案**：このステップの主な目的は、すべての詳細項目からシステム全体像を抽出して、システム内の各種機能に優先順位を付けることです。どのテスト段階でどのテスト項目を重視するのかが決定します。



- **テスト計画の作成**：統合テストの各種テスト項目を、そのテスト内容に従って複数のテストチーム（ECU サプライヤおよび後のテストドライブ）へ割り当てます。

- **テスト仕様の決定**：このステップはテストシステムのセットアップ以前に開始します。テスト仕様書がHIL 運用チームに対して詳細なテストケースを指示します。複数の拠点を持つ開発プロジェクトでは、開発者とテスト実施者との間のコミュニケーションが特に重要となります。

- **テストの構築**：自動化テストをテスト仕様書に基づいて作成します。

- **テストの評価**：テスト中に見つかったエラーをセントラルリストで管理します。このリストは関連する要件、テスト仕様書、テスト結果へダイレクトにリンクされます。関係するサプライヤへエラーが通達され、エラー対応の期限と方策が合議されます。

テストとエラー対応のステータスはすべて定期的レポートに集約され、プロジェクト進行状況とシステム完成度に関する情報がすべての組織階層で常に共有されます。

テストの自動化

MBtech 社テスト運営チームの統合テストベンチにおける主要タスクは、自動化 ECU テストの構築と実施です。これには

「テストシステムとテストケースの高い再利用性により、複雑なネットワークシミュレータの導入が新規プロジェクトでも容易に行えます」

Stefan Abendroth 氏、MBTech グループ

継続的に更新される ECU ロジックの実装、HIL ハードウェアの拡張と保守、環境モデルの適合とさらなる開発、テストシステムのサポート業務（測定または他チームとの連携テストを実施する場合など）が含まれます。テストオートメーションにおいては、ECU ネットワークの初期テストが最大の難関となります。初期テストではテストシステム全体への完全なアクセスが必要なため、テストケースや ECU ロジックの複雑さによっては長時間を要します。このような状況においては、HIL システムのモジュラー構造が効果を発揮します（インテリア/シャシー/パワートレインの各サブシステムが独立して平行に動作可能なため）。自動化テストの初期のプログラミング（図 4）はテストシステムから独立して行えるため、テストケースの開発やその他のシステムサポート業務が並行して同時に行えます。

テストの再利用

市街バスから観光バスへのモデル変更や、異なる車両バリエーションへのモデル変更においては、作成済みまたはテスト済みのテストケースを可能な限り再利用

することが重要です。このためテストオートメーションは、Daimler グループの「実証済み」（Tried-and-Tested）ライブラリコン概念に基づきます。これにより、テスト内のセントラルポイントで基本車両データを置換することによって、同一テストが複数の車両バリエーションで使用できるようになります。このような対応は長期的な観点でテスト構築の効率を改善し、テスト結果の比較を容易にします。

1 年間の実績

運営開始から 1 年の間に、統合テストベンチ上で新 E/E プラットフォームのさまざまな ECU がネットワーク化され、それらが初めて相互に作用しあいながら作動しました。このテストベンチは、初の完全なネットワーク統合と、初のテストシステム使用という 2 つの難関に同時に直面しました。しかし非常に早い段階で、テスト対象の問題を検出して解析することができました。この 1 年間で、2 つの極端に高度なサブシステム（パワートレインとシャシー）と複雑な環境モデルを含むすべてのシステムが閉ループで正常に作動しました。仮想テストドライブはこのようにして実験室状



左：Ian Suckow 氏、Daimler Buses – EvoBus GmbH、ドイツ

Ian Suckow 氏は、EvoBus 社（マンハイムおよびノイ・ウルム、ドイツ）における統合/システムテストのプロジェクトリーダーです。

中央：Stefan Abendroth 氏、MBtech グループ、ドイツ

Stefan Abendroth 氏は、MBtech グループ（ジンデルフィンゲン、ドイツ）における商用車テストのリーダーです。

右：Martin Müller, dSPACE GmbH、ドイツ

Martin Müller は、dSPACE のプロジェクトセンター（シュトゥットガルト、ドイツ）において、お客様専用カスタマイズされた HIL シミュレータの計画と設計を担当しています。

態で実現可能であり、そこには ABS によるブレーキ制御への介入や複雑な運転操作を含めることすら可能です。このテストベンチは作成済みのテストケースを自動的に実行することができます。自動化された回帰テストを ECU の新しいサンプルバージョンに対して実施すれば、バグフィックスも行えます。徹底的なテストで得られたシミュレータからのテスト結果によって、ネットワーク全体の制御ロジックの妥当性が早期に確認できます。統合開発プロセスによってシステムネットワークの完成度が向上し、これはプロトタイプ車両のテ

スト工数を削減するとともに、高い量産品質を約束します。工数のかかるテストにオペレータモデルを適用すれば、ECU 開発者を複雑なテストシステム操作から開放することができます。以上のようにして、HIL 統合テストはバス E/E 開発における不動の役割を獲得しました。

現在この統合テストベンチは、観光バスの追加システムをテストするために拡張中です。EvoBus 社は追加の安全システムとハイブリッドや燃料電池などの将来的代替パワートレインへ HIL テストを適用するための準備を進めています。■

Ian Suckow, Daimler Buses – EvoBus GmbH
Stefan Abendroth, MBtech Group
Martin Müller, dSPACE GmbH

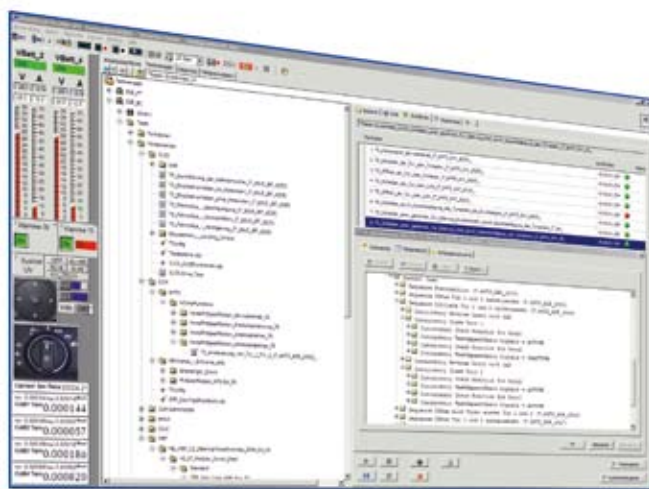


図 4：PROVech：MBtech 社のテストオートメーションソフトウェア

まとめ

- HIL シミュレーションがバス E/E アーキテクチャの ECU 開発と並行して使用されました。
- 環境モデルとシミュレータハードウェアとの間の円滑な相互作用によって、早期の仮想テストドライブが実現しました。
- テストプロセスにおけるエラー検出のフロントローディング（早期化）は開発/テスト時間を短縮します。