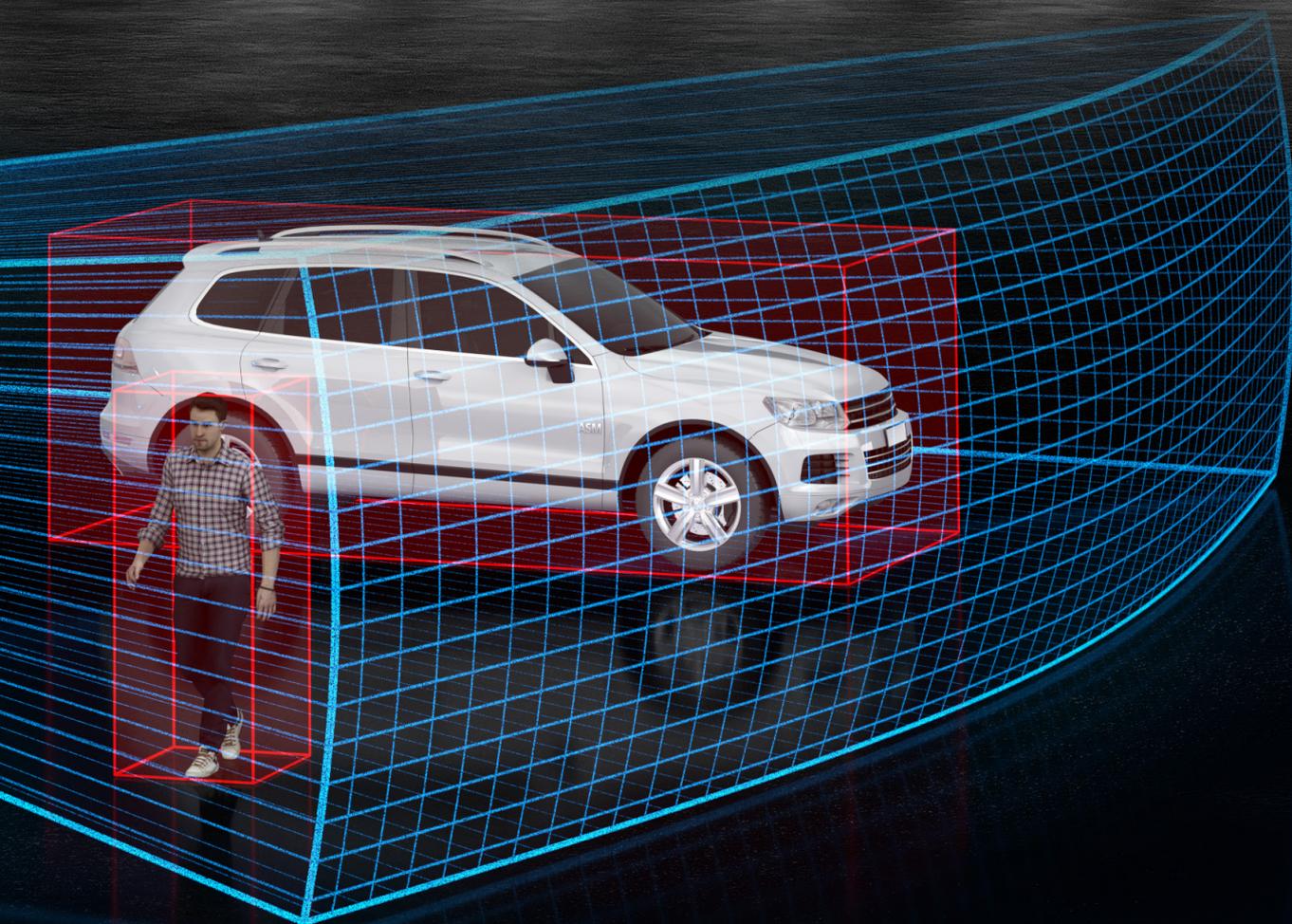


Objective

Capture

現実的なセンサシミュレーションによる
自動運転機能の妥当性確認

自動運転車両は、センサを使用して周囲の状況を認識します。早期の段階で車両の機能を効率的に検証するには、環境、センサ、および車両を仮想的な走行テストで現実的にシミュレートしテストする必要があります。この目的のため、dSPACEでは強力なハードウェアおよびソフトウェアで構成された統合ツールチェーンを提供しています。



自 動運転車両が道路交通の一部として機能する可能性については、もはや疑問の余地はありません。それがいつ実現されるかの方がより大きな問題です。レベル4車両の量産準備が整うのは、2020年から2021年と予想されています。この目標を達成するためには、運転機能をまだ開発中の段階から妥当性確認もできるようにすることが不可欠

です。つまり、開発者は運転機能と（カメラ、LiDAR、レーダーなどの）環境センサを組み合わせ、疑似現実をラボで作出し、その中のトラフィックシナリオでシミュレーションを行うことが必要です。これに代わる選択肢は実際の路上でのテストドライブとなりますが、この場合、すべての必須シナリオをカバーするためには実車で何百万キロメートルも走行することが必

要になります。つまり、不可能という単純な理由から実行できません。

妥当性確認プロセスの条件

自動運転機能の妥当性を確認する場合の重要な条件は、多数存在します。

- 多数の（時には40以上の）異なるセンサ（カメラ、LiDAR、レーダーなど）から計測された値を同時に考慮する必要

>>

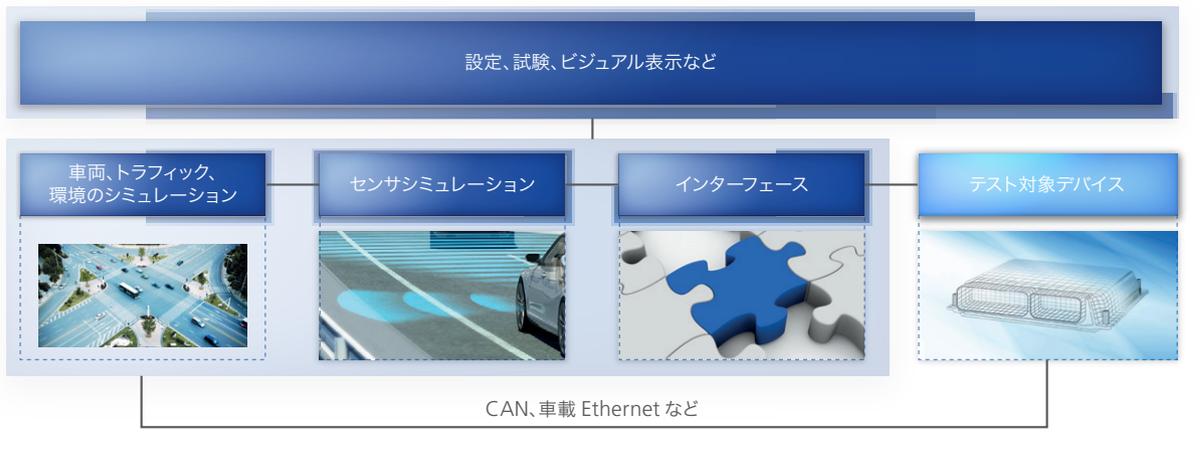


図1：ADASおよびAD機能向けシミュレーション環境の基本構造。標準的なPCテクノロジー(MIL/SIL)を活用したり、実際の制御ユニット(HIL)を組み込むことにより、純粋な仮想シミュレーションを実行できます。

があることから分かるように、高度に自動化された自動運転機能は極めて複雑です。

- テスト対象の各種のトラフィックシナリオ（車両、歩行者、道路標識など）はほぼ無限であるため、テストには複雑な仮想3Dシーンが必要となります。
- 光パルス、マイクロ波などの放出または捕捉に伴う物理的なプロセスは、非常に演算負荷の高い物理環境およびセンサモデルとして統合しなければなりません。これには、誘電率や粗度など、オブジェクトの材料特性の影響も含まれます。
- ISO 26262規格（道路車両 - 機能安全性）への適合性を保証するため、何百万キロメートルものテストドライブに対応する必要があります。また、重大な運転状況には特に注意を払い、必要に応じて走行距離が適正であるか確認することも必要です。

dSPACEでは、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせることにより、センサシミュレーションのすべての前提条件を開発プロセス全体を通じて考慮できるようにする強力なツールチェーンを構築しています。これを使用することで、開発者は早期の段階でエラーを特定できるようになり、極め

て効率性の高いテストプロセスを設計できるようになります。

シミュレーションの必然性

妥当性確認プロセスで求められる要件を満たすには、運転機能の検証と妥当性確認を開発プロセスのすべての段階で行うことが必要です。シミュレーションは、これを実践するための最も効率的な方法です。自動運転機能は非常に複雑です。そのため、MIL (Model-in-the-Loop) から SIL (Software-in-the-Loop) および HIL (Hardware-in-the-Loop) に至るまでの開発プロセスのすべての段階において、すべてのプラットフォームに関連するテストケースを再現し再利用できることが不可欠となりますが、これを実現できるのは、統合型のツールチェーンのみです。

シミュレーション環境の構造

クローズドループシミュレーションの構造は、MIL/SILやHILの構造と同じです(図1)。このシミュレーションでは、基本的に車両、トラフィック、環境、およびセンサのシミュレーションに対応しています。インターフェースは、センサシミュレーションとテスト対象デバイス(自動運転用の制御ユニットまたは機能ソフトウェア)の接続に使用します。また、シミュレーションモデルの設

定、テストの実行、シーンのビジュアル表示などを選択できるオプションも必要です。さらに、FMI、XIL-API、OpenDrive、OpenCRG、OpenScenario、Open Sensor Interfaceなどの一般的なインターフェースや規格をサポートすることも重要です。これらは、German In-Depth Accident Study (GIDAS: ドイツ事故詳細調査)の事故データベースのデータを実装したり、協調シミュレーションなどのトラフィックシミュレーションツールを統合する際に必要となります。

車両、トラフィック、および環境のシミュレーション

センサシミュレーションの基本は、さまざまな道路利用者が相互に作用するトラフィックシミュレーションです。dSPACEでは、これに対応するため、Automotive Simulation Models (ASM) ツールスイートを提供しています。ASMを使用すると、仮想環境上で仮想テストドライブを定義することができます。ASM Trafficモデルでは、道路利用者の動きを計算できるため、追い越し運転、車線変更、交差点の交通などをシミュレートできます。ここでは、センサモデルが車両と仮想環境との相互作用における重要な役割を果たします。

dSPACE ツールチェーンは、開発プロセス全体を通じて高精度のセンサシミュレーションをサポートしています。

	<p>環境センサインターフェース (ESI) ユニット データおよびターゲットリストをセンサ ECU に挿入</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 生のセンサデータを同期挿入できる強力な FPGA ■ 幅広いインターフェースに柔軟に対応可能
	<p>センサシミュレーション PC ターゲットリストまたは生データを供給する環境センサ (レーダー、LiDAR、カメラ) の環境モデルを計算するセンサシミュレーション用プラットフォーム</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 環境モデルを計算する強力な NVIDIA® GPU を搭載
	<p>SCALEXIO HIL および RCP プロジェクト用のモジュール型のリアルタイムシステム</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 各種センサ (カメラ、レーダー、LiDAR など) の統合オプション ■ ADAS および自動運転システムの機能チェーン全体のテスト ■ ConfigurationDesk による簡単な設定
	<p>VEOS どのシミュレーションハードウェアにも依存せず、開発の早期の段階で ECU ソフトウェアの妥当性を確認できる PC ベースのシミュレーションプラットフォーム</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Simulink® モデル (dSPACE ASM など) のサポート ■ クラスタとのスケーラブルな組み合わせにより、リアルタイムよりも高速なシミュレーションを実現
	<p>Automotive Simulation Models (ASM) 車載アプリケーションをシミュレートできるさまざまなモデルで構成されたツールスイート</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 運転操作、道路、車両、道路利用者、トラフィックオブジェクト、車載センサなどのシミュレーション ■ ModelDesk を使用したモデルのパラメータ設定
	<p>MotionDesk 3D アニメーションおよびセンサシミュレーション用のソフトウェア</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ トラフィックシナリオの 3D リアルタイムビジュアル表示、および各種カメラ (モノ、ステレオ、魚眼) のテスト用ビデオフレームの生成 ■ レーダー、カメラ、および超音波センサのオブジェクトリストを使用したセンサ環境モデル、および 3D ポイントクラウドデータ

図 2 : センサシミュレーションに対応した dSPACE ツールチェーンの主要製品の概要。

センサの構造と機能

センサを使用する目的は、センサの生データによってターゲットをまず特定し、オブジェクトを検出することです。データには、一定の相対速度で記録される局所的に集積した反射点などを含めることができます。次に、これらの反射点の特徴的な配置から、(車両、歩行者、道路標識などの) 分類されたオブジェクトを識別します。カメラ、レーダー、および LiDAR センサは基本的なデザインがよく似ており、一般的にフロントエンドでデータのプリプロセス処理を行う構成となっています。その後、データ処理ユニットが生データのストリームを生成してターゲットリストを出力し、別のユニットがオブジェクトリストを生成して位置データを供給します。さらに、アプリケーションロジックとネットワーク管理などのフローが続きます。

センサシミュレーションで使用されるセンサの統合オプション

種類が異なっても同様の構造を持つセンサは、シミュレーションにそれぞれ容易に統合することが可能です。また、適切に準備されたシミュレーションデータを必要に応じて個々のデータ処理ユニットに挿入することも容易です (図 4)。どのような統合オプションが適切かは、シミュレーションでセンサの特性をどの程度完全かつ現実的に再現する必要があるかや、センサのどの部分をテストするかによって異なります。環境シミュレーションをカメラベースの制御ユニット (オプション 4) などに供給する場合には、無線 (OTA) でのステミュラス信号入力を使用します。カメラセンサでは、周囲のアニメーションシーンを表示するモニタの画像を取得します。この手法では、カメラレンズや画像センサ

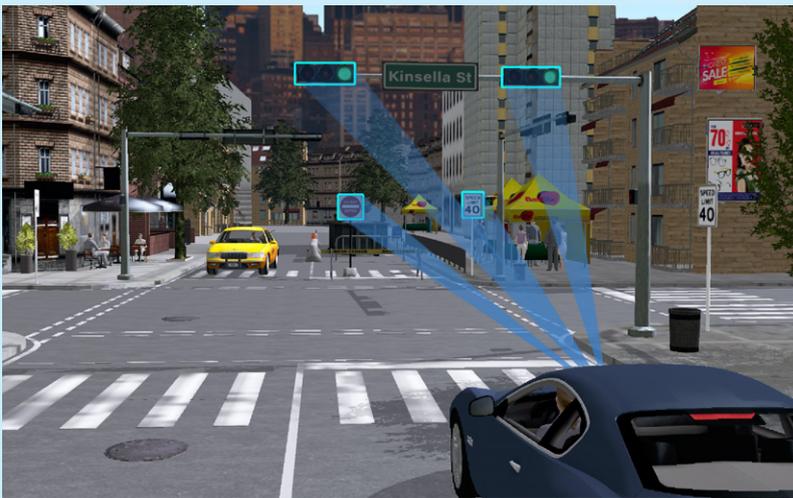
を含めた処理チェーン全体をテストすることができます。デジタルセンサデータ (オプション 3) は、生のセンサデータ、すなわちデータのプリプロセス処理 (オプション 3b) の直後に返されるデータと、ターゲットリスト (オプション 3a) とに分類することができます。たとえば、カメラセンサの場合、これは画像データストリーム (生データ) または検出されたターゲット (ターゲットリスト) になります。次のレベルは、分類されたターゲットとトランザクションデータが含まれたオブジェクトリストです (オプション 2)。センサと関係のないテストには、レストバスシミュレーションを使用します (オプション 1)。オブジェクトリストとターゲットリスト、および生データを使用したシミュレーションが HIL および SIL の両シミュレーションに対応したアプリケーションシナリオであるのに対し、

>>

物理的／現象的モデル

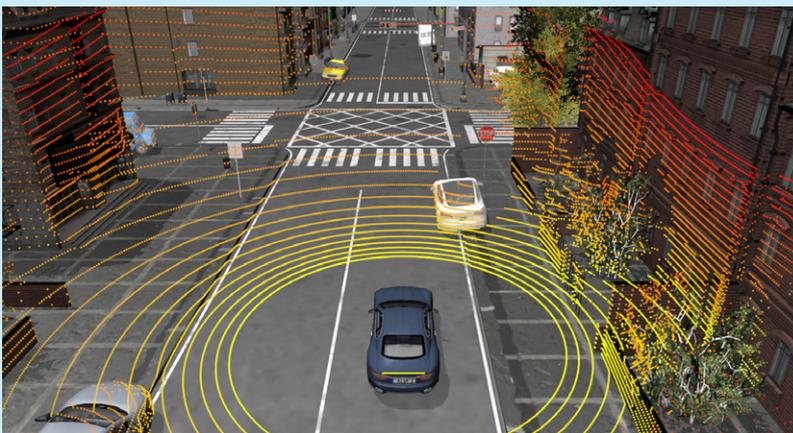
dSPACE は、生データやターゲットリストを一般的に供給するカメラ、レーダー、および LiDAR センサをシミュレートするための極めて高精度な物理センサ環境モデルを開発しました。これらは画像演算処理装置 (GPU) での計算を考慮して設計されています。

カメラモデル



カメラベースの運転支援または自動運転機能の妥当性確認を行う場合、基本的に、異なるレンズタイプだけでなく、レンズの色収差や口径食などの光学的効果も考慮する必要があります。また、パノラマビューでさまざまな画像センサ (モノ/ステレオカメラ) や複数のカメラをシミュレートできるオプションも必要です。さらに、妥当性確認では、センサの特性、色 (単色表現、ベイヤーパターン、HDR など)、ピクセルエラー、および画像ノイズが重要な要素になります。

LiDAR モデル



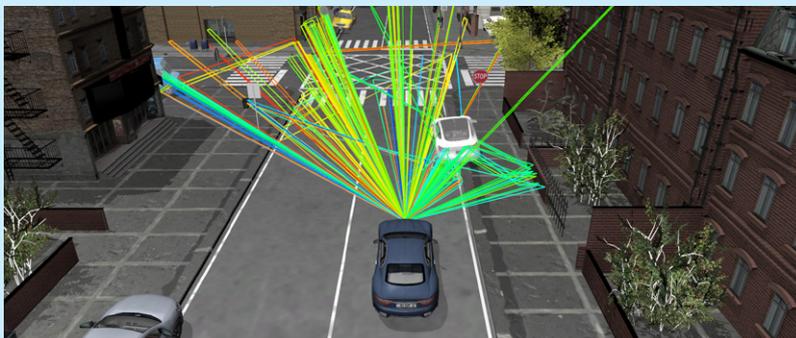
特定の動作モードを光波に合わせて設定できることや、3D シーンで使用されるオブジェクトに反射率などの表面特性が設定されていることが不可欠です。また、光の散乱が雨、雪、または霧によって変化することや、1本の光線が複数のオブジェクトによって反射される可能性があることも考慮する必要があります。これらの状況により、センサ表面全体に振幅分布が生じ、それがさらに (ムービングオブジェクト、静止オブジェクトなどの) 環境や時間によって変化します。LiDAR モデルは、ポイントクラウドから生データに至るまでの幅広いアプローチに対応しています。

LiDAR システムでは、レーザーパルスを放射し、オブジェクトから反射した光を計測します。これにより、オブジェクトまでの距離を経過時間から導き出します。また、このシステムでは距離だけでなく、オブジェクトの表面状態によって変化する反射光

の強さも計測されます。これにより、ポイントクラウドの形で環境を記述できるようになるため、データを距離や強度に関する情報を含むターゲットリストとして利用できるようになります。ただし、LiDAR モデルでは、角度分解能を含めたセンサの

>>

レーダー環境モデル



レーダーは、雨、雪、霧などの悪天候条件や極端な照明条件でも確実に使用できるため、ADAS/AD 運転機能において重要な役割を果たします。レーダーセンサを使用すると、オブジェクトの種類、すなわち車両、歩行者、自転車などを特定するだけ

でなく、それらの距離、垂直および水平方向の角度、さらには相対速度や絶対速度も計測することができます。おそらく、最も重要なレーダーテクノロジーの1つは、周波数変調信号を使用する周波数変調連続波レーダー (FMCW) です。これは、連

続波レーダーとも呼ばれます。最新のレーダーシステムは、1計測周期で約128の周波数変調信号を送信します。レーダーは、オブジェクトによって反射された信号(エコー信号)を検出します。ここでは、周波数の変化と生成された信号を使用して、オブジェクトの距離を計測します。オブジェクトの速度はドップラー周波数によって特定することができます。dSPACEのレーダーモデルを使用すると、たとえば、モデリングにおいて多重伝播、反射、および散乱を考慮することができるため、センサ経路の挙動を現実的に再現できます。

OTA スティミュラス信号入力およびレストアシミュレーションはHILのみで使用できます。

センサモデリングの種類

さまざまなセンサ統合オプションのそれぞれには、適切に処理されたデータを提供するためのセンサモデルが必要です。基本的に、センサシミュレーションのモデルは、その複雑さや現実との近似性によって分類することができます(図3)。オブジェクトリストまたはターゲットリストを返すのは、実際の参照データに基づいたグラウンドトゥールズモデルと、イベントまたは状態の発生確率に基づいた確率モデルという2種類のモデルです。一般的に、生データは現象的(すなわちイベントや状態のパラメータに基づく)モデル、または物理的(すなわち数学的に定式化された法則に基づく)モデルによって供給されます。開発する運転機能の妥当性確認を行う場合は、開発の用途や時期に応じて適切なモデルを使用します。

グラウンドトゥールズモデルと確率モデル

ASM Trafficシミュレーションモデルには、SILまたはHILの用途でオブジェクト

リストレベルでテストを行うための多数のセンサが含まれています。

- 3Dレーダーセンサ
- 2D/3Dオブジェクトセンサ
- カスタムセンサ
- 道路標識センサ
- 車線区分線センサ

これらのセンサモデルは、VEOSまたはSCALEXIOプラットフォームを使用したCPUベースのシミュレーション用に設計されています。確率モデルを使用すると、オブジェクトリストに基づいて、検出されたオブジェクトごとに霧や雨の環境条件などの現実的な影響を複数のターゲットに重ね合わせるすることができます。これらをすべて使用してレーダーの特性をエミュレートし、ターゲットリストを計算します。

SIL (Software-in-the-Loop) シミュレーションによる妥当性確認

SIL (Software-in-the-Loop) シミュレーションを使用すると、標準的なPCテクノロジーを用いてセンサベースの制御ユニット向けソフトウェアを仮想的に検証することができます。ハードウェアプロトタイプが

まだ入手できない早期の段階では、シミュレーションを用いることにより、アルゴリズムをテストできます。また、VEOS(図1)とその対応するモデルを使用すると、リアルタイムよりも高速な計算が可能になります。スケーラブルなPCクラスターで演算を行うオプションを追加すれば、速度はさらに向上します。これにより、極めて幅広い多数のテストケースを管理できるようになります。また、何百万キロメートルものテストドライブをタイムリーにカバーする必要のあるテストも実行できます。SILシミュレーションでは、VEOSを使用することにより、車両、環境、およびトラフィックシミュレーション、さらには(該当する場合は)仮想制御ユニットも計算します。また、グラウンドトゥールズモデルや確率モデルをベースとしたシミュレーションでは、モデルはVEOSにも統合されます。現象的または物理的なセンサモデルを使用する場合、GPU上で計算を行うセンサシミュレーション(カメラ、レーダー、LiDAR)用のアプリケーションは、常にVEOSと同じプラットフォームで実行されます。環境シミュレーションのモーションデータがセンサシミュレーションに転送されると、レーダー、LiDAR、またはカメラセンサのモデ

>>

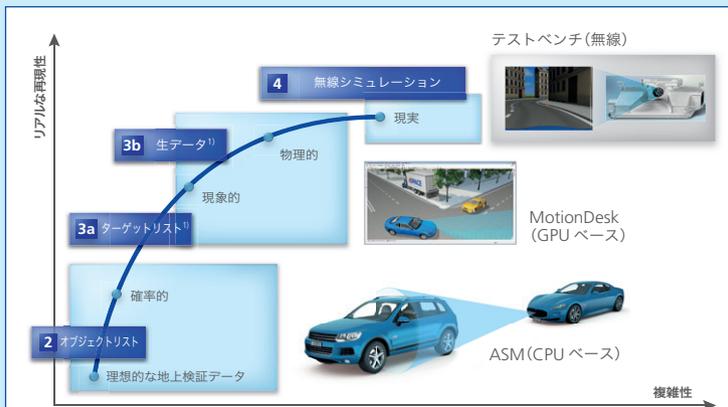


図3：センサシミュレーションの現実度とさまざまな機能の複雑さとの相関関係。

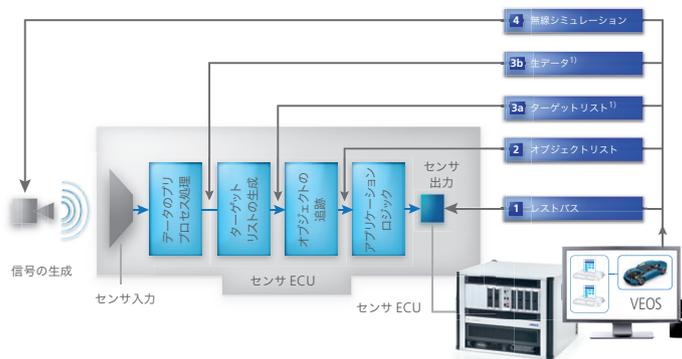


図4：環境センサに対しスティミュラス信号入力またはシミュレーションを行う場合のさまざまなオプションの概要。



¹⁾ オプション 3a および 3b では、オブジェクトの識別段階が異なるデジタルセンサデータを示します。

ルが計算されます。つまり、生データのシミュレーションは、センサの物理的特性を考慮しながら、現実的な環境や複雑なオブジェクトを含む複雑な 3D シーンおよびモーションデータに基づいて行われます。この演算は高性能グラフィックスプロセッサ上で実行され、それにより、レーダーや LiDAR などの環境モデルを計算するための光線追跡アルゴリズムがシミュレートされます。このセンサシミュレーションの結果は、さらにセンサベースの仮想制御ユニットに送信されます。この通信は、Ethernet または仮想 Ethernet を介して行われます。このテクノロジーは、センサベースの仮想制御ユニットと車両シミュレーションのやり取りにも使用されます。

HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレーションによる妥当性確認

HIL (Hardware-in-the-Loop) シミュレーションを使用すると、記録されたデータまたは人工的なテストデータに基づいてスティミュラス信号を入力することにより、ラボで実際の ECU をテストできます。SIL シミュレーションとは異なり、HIL シミュレーションでは制御ユニットの正確な時間的挙動を調査することができます。dSPACE SCALEXIO HIL プラットフォームでは、トラフィック、ピークルダイナミクス、および環境シミュレーションを行います。CAN や Ethernet などを通じて車両シミュレーションを車両ネットワークに接続すると、レストバスシミュレーションが可能になります。車両や他のオブジェクトのモーションデータは、カメラ、LiDAR、レーダーのセンサ環境モデルを計算できる高性能グラフィックスプロセッサを搭載した強力な PC に Ethernet 経由で送信されます。各種のセンサから取得されたこのデータ (生データまたはターゲットリスト) は集約され、ディスプレイポートを介して環境センサインターフェイス (ESI) ユニットに送信されます。ESI ユニットは、関連するすべてのプロトコルやインターフェイスに対応できるように、高度にモジュール型の設計となっています。ESI ユニットの高性能 FPGA では、すべてのセンサからのデータストリームを専用センサの個々のデータストリームに変換し、それらをさまざまなインターフェイスを介して対応するカメラ、LiDAR、またはレーダー制御ユニットに送信します。

dSPACE の物理センサモデルを使用すると、カメラ、LiDAR、およびレーダーセンサの生データを最高の精度でシミュレートできます。

**無線スティミュラス信号入力による
妥当性確認**

無線 (OTA) スティミュラス信号入力は従来型のセンサテスト手法であり、センサベースの制御ユニット全体を制御ループに統合します (図 5)。この設計は、カメラのレンズや画像センサなど、センサのフロントエンドをテストする場合に最適です。ここでは、SCALEXIO を使用して車両、環境、およびトラフィックシミュレーションの計算を行っています。カメラセンサのテストでは、SCALEXIO シミュレータと MotionDesk を使用して、トラフィックシーンをシミュレートし、画面に表示します。カメラの場合、実際の街路の場面が仮想シーンで再現されます。また、dSPACE Automotive Radar Test System (DARTS) により、レーダーエコーが SCALEXIO シミュレータで計算された運転シナリオと協調した形でレーダーセンサに渡されます。これにより、ACC (アダプティブクルーズコントロール) や AEB (自動緊急ブレーキ) などの運転機能の検証も可能になります。

まとめ

自動運転車両が道路状況を考慮しながら安全に走行するためには、ADAS/AD 機

能によって、あらゆる運転シナリオで正しい判断を下さなければなりません。ただし、考えられる運転シナリオの数は事実上無限です。そのため、ラボでの ADAS/AD 機能要件のテストは非常に複雑なものになります。これらのテストは、すでに単一のテスト手法だけでは実施できなくなっており、さまざまなテスト手法を組み合わせることが重要です。これらの手法には、MIL、SIL、HIL、オープンループテスト、クローズドループテスト、さらには実際のテストドライブなどがあります。この複雑なテストおよびツール環境を考慮した場合、妥当性確認プロセスの信頼性向上の鍵となるのは、柔軟性に優れた統合ツールチェーンを構築し、シミュレーションモデルとテスト対象のデバイスに汎用性の高いインターフェースと統合オプションを提供できるようにすることです。つまり、センサおよび環境シミュレーションに対応した dSPACE ツールチェーンこそ、非常に便利かつ有効なソリューションであると言えます。このツールチェーンでは、シングルソースからさまざまなツールを提供できるため、ツール間のスムーズな相互連携が実現し、妥当性確認プロセスの大幅な効率化が可能です。 ■

図 5 : さまざまな環境センサに対する無線スティミュラス信号入力の原理

