



デジタルインダストリーズソフトウェア

シーメンスの 自動ツールチェーンを活用

先進運転支援システムと自動運転車機能をテスト、仮想検証

エグゼクティブ・サマリー

急速に発展する自動運転車 (AV) には、その安全性と信頼性を確保するための堅牢なテストおよび検証の手法が不可欠です。このホワイトペーパーでは、先進運転支援システム (ADAS) およびAV機能をテスト、仮想検証するためのシーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアの自動ツールチェーンを紹介します。このアプローチで、シナリオベースのテストと仮想検証、および意図した機能の安全性 (SOTIF) 規格への準拠を統合して、AVの安全性を包括的に評価します。メーカーは、国連欧州経済委員会 (UNECE) および欧州連合 (EU) の規則で提案された、複数の柱からなる安全性検証フレームワークに基づいて、シーメンスのツールチェーンを使って効率的にシナリオを抽出し、クリティカル・シナリオを作成して、大規模な仮想検証を行うことができます。シーメンスは、ソフトウェア・インフラストラクチャとシナリオ生成に取り組むことで、ADA/AVシステムの信頼性と安全性を向上させています。

Mohsen Alirezai, Alexandru Forrai, Son Tong, Tajinder Singh, Jeroen Ploeg
シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

目次

はじめに	3
シナリオベースのテストと仮想検証を導入	3
自動運転システムの安全性検証	3
より安全かつ効率的なADAS/AVのテストに貢献	4
シナリオベースのテストと仮想検証のためのシーメンスのソリューション	5
要件管理とデータ収集	6
要件管理	6
データ収集	6
シナリオの抽出と作成	7
データ解析	7
クリティカル・シナリオの作成	8
標準シナリオ	9
評価	10
ソフトウェア・イン・ザ・ループ (SiL) テスト	10
ハードウェア・イン・ザ・ループ (HiL) テスト	10
まとめ	11
参考文献	11

はじめに

AVは、社会にとって大きな可能性を秘め、道路の安全と効率を向上させると期待されています。ところが最近の事故により、「AV車両を広く展開する前に、AV車両の安全性を確保することが非常に重要である」こと

が浮き彫りになっています。劇的な進歩にもかかわらず、AVの検証・妥当性確認には依然として課題があり、AVを日常の交通システムへシームレスに統合するうえでの障害となっています。

シナリオベースのテストと仮想検証を導入

シナリオベースのテストと仮想検証、SOTIF規格への準拠は、ADAS/AVの評価で極めて重要な役割を果たします。これらの手法により、幅広いシナリオでの徹底的な評価が可能になり、広範な公道テストの必要性が低減します。従来の検証手法では、実環境の交通シナリオの複雑さを捉えるには不十分ですが、シナリオベースのテストと仮想検証を使えば、さまざまな条件下でのシステム性能に関する知見を得ることができます。シナリオベースのテストや仮想検証と並行してSOTIFを組み込むことで、メーカーはADAS/AVシステムの信頼性と安全性を向上させ、輸送ネットワークへのADAS/AVシステムの展開と統合を成功させることができます。

自動運転システムの安全性検証

複雑化が進むなか、テスト手法の根本的な変更と、規則に盛り込まれている新たな概念（物理世界と仮想世界での包括的な車両検証・妥当性確認）が必要になっています。

2021年2月、国連欧州経済委員会 (UNECE) は、自動運転システム (ADS) の安全性検証に、複数の柱からなるアプローチを導入したフレームワーク「自動運転の新たな評価・テスト手法 (NATM)」^{1,2}を提示しました (図1)。

2022年8月には、欧州委員会 (EU) が、完全自動運転車のADSの型式承認にかかわる統一の手順と技術仕様に関して、欧州議会および理事会の規則 (EU) 2019/2144を適用するためのルールを定めた規則 2022/1426を採択しました。^{3,4}

7月7日には、スピード・リミッターを含む車両のアクティブセーフティ機能に関する新しいルールがEU全域で施行されました。

新車両一般安全規則 (GSR2)⁵または規則 (EU) 2019/2144は、EU内の自動車の最低性能基準（型式承認）を更新し、複数のADASの追加を義務付けています。

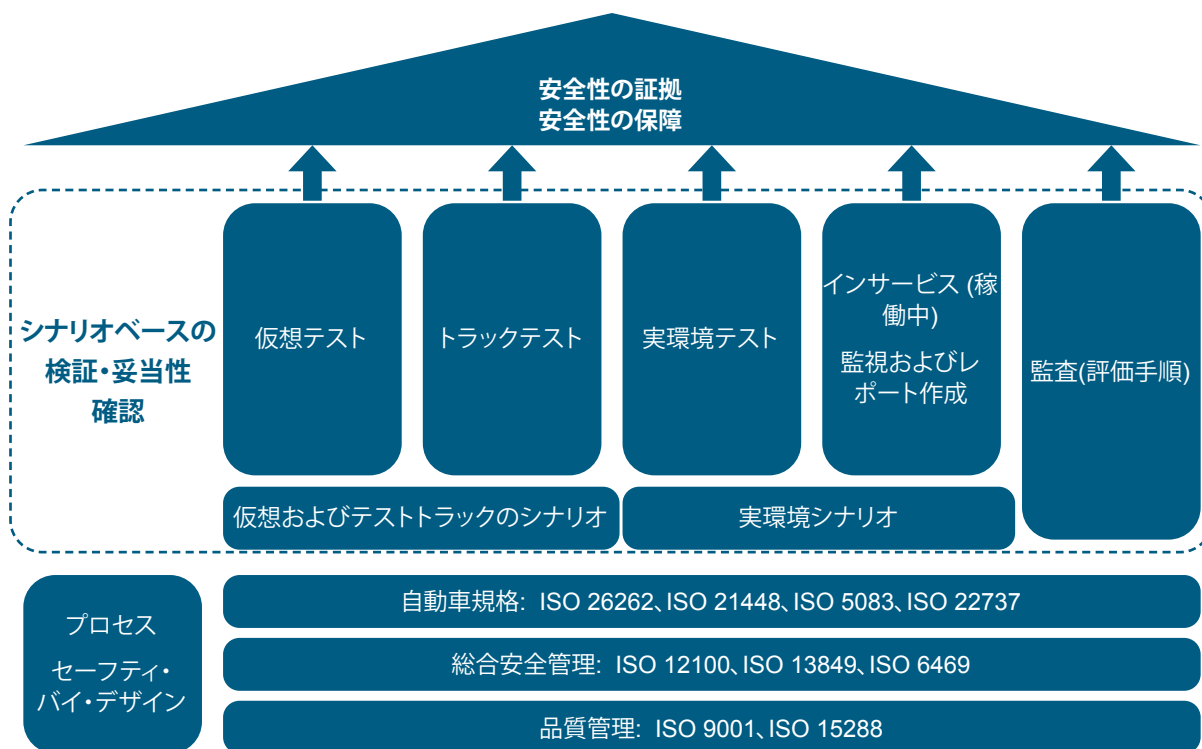


図1 シーメンスによる、複数の柱からなるUN-ECE NATMの自動運転システム安全性検証。

追加が必要になったシステムは、インテリジェント・スピード・アシスト (ISA)、自動緊急ブレーキ (AEB)、ドライバーの眠気および注意警告 (DDAW)、緊急車線維持システム (ELKS) などです。

複数の柱からなる自動運転車の安全性検証では、安全性の議論を裏付ける5つの認証の柱が指定されています。仮想テスト、トラックテスト、実環境テストはシナリオベースであり、仮想テストから実環境テストへ移行するにつれて、シナリオの数が減少し、現実性が高まります。

展開後、監視とレポート作成のフェーズで関連するシナリオを記録し、シナリオを抽出、選択した後、それらを仮想テスト、テストトラックでのテスト、実環境テスト・プロセスにフィードバックできます。新しいシナリオを記録して抽出することで、未知の危険なシナリオを発見し、自動運転システムを継続的に改善することが可能になります。

最後に、EUの法律とUNECE NATM (「インサービス (稼働中) と監視の柱」を参照) には、ソフトウェア業界でよく知られている継続的統合と展開のワークフローが導入されていることに注意することが重要です (「開発とオペレーション (DevOps)」を参照)。

より安全かつ効率的なADAS/AVのテストに貢献

シーメンスは、国際規格や法律に準拠したソフトウェア・ツール・スイートと統合型のツールチェーンを提供し、スケーラブルなソリューションで包括的な安全性検証ワークフローを実現しています。このツールチェーンは、自動化された効率的なシナリオ生成を容易にし、記録されたデータを活用して既知の安全なシナリオを抽出するとともに、既知の危険なシナリオを生成して未知の危険なシナリオを識別します。シーメンスは、ソフトウェア・インフラストラクチャとシナリオ生成の側面に取り組むことで、ADAS/AVシステムの検証プロセスの効率化と、潜在的な安全リスクの軽減に大きく貢献しています。

シナリオベースのテストと仮想検証のためのシーメンスのソリューション

シーメンスは、シナリオの広範なデータベースを体系的にコンパイルし、モデル・イン・ザ・ループ (MIL)、ソフトウェア・イン・ザ・ループ (SiL)、ハードウェア・イン・ザ・ループ (HiL) のテスト・プラットフォームを組み合わせ、AVスタックを効果的かつ確実に評価し、テスト結果や新しい要件に基づいて検証・妥当性確認 (V&V) プロセスを反復できるように設計された最先端のツールチェーンを提供しています。

ツールチェーンは、次の3つの主要なフェーズで構成されています。

要件管理とデータ収集 – 要件は、運行設計領域 (ODD)、動的運転タスク (DDT)、および適用される規則や規格に基づいて収集されます。シーメンスの要件管理ツールを活用すれば、新しい要件をV&Vプロセスへ、追跡可能な形で柔軟に統合できます。ODDのデータ収集では、ODDに固有のアクターの動作やパターンが取得されます。シーメンスは、センサーのセットアップ、データの記録、データ処理のためのエンジニアリング・サービスを提供しています。

シナリオの抽出と作成 – Simcenter™ Autonomy Data Analysisソリューションや特許取得済みのクリティカル・シナリオ作成 (CSC) ワークフローなど、シーメンスのツールチェーンを使用すれば、SOTIFに従ってすべてのカテゴリーのシナリオを抽出できます。Simcenterは、ソフトウェア、ハードウェア、サービスで構成されるビジネス・プラットフォーム、Siemens Xceleratorの一部です。Simcenter Autonomy Data Analysisを活用すると、データを解析して既知のシナリオタイプを抽出するとともに、安全しきい値を適用して安全な動作と危険な動作を定義することができます。特許取得済みのクリティカル・シナリオ作成ツールは、記録されたデータの検索領域を定義します。その後、最適化ベースのアプローチが、重大度と新規性に基づいて、既知の危険なシナリオと未知の危険なシナリオを体系的に識別します。

評価 – シーメンスの物理ベースのシミュレーター、Simcenter Prescanソフトウェアを使用すると、抽出されたシナリオと、規格や規則の関連プロトコルのシナリオに基づいて、AVの大規模な仮想検証を実行できます。シーメンスのHiLテストベッドにより、結果の信頼性はさらに向上します。

要件管理とデータ収集

記録計画の設定と定義の要件は、ADAS/AVシステムの安全性を評価する最初のステップです。

要件管理

ADSの開発は、ODDとDDT を定義または記述することから始まります。次に、適用される規則や国際規格を収集し、自動運転システムの要件定義を開始します。要件は、安全性、システム、ハードウェア、ソフトウェア、ユーザーなどのカテゴリーに分類されます。開発プロセスでは、既存の要件が変更されたり新しい要件が定義されることが頻繁にあります。このため、要件管理ツールの使用は必須です。シーメンスは、Siemens Xceleratorビジネス・プラットフォームの一部であるPolarion™ポートフォリオなどのソフトウェア・ツールで、要件管理をサポートしています。トレーサビリティとは、要件から成果

物、テスト実行、および製品ライフサイクルのその他の要素まで追跡する機能を指し、ほとんどのケースで必須です (図2を参照)。

データ収集

ODDと個々のシーンのデータは、計装車両、静的なドローン映像、またはインフラストラクチャに取り付けられたセンサーを使用して収集できます。シーメンスは、実環境シナリオを記録するために設計された包括的なセンサーのセットアップを支援します。

収集されたデータには、ノイズ、検出の見逃し、オクルージョンなどによるエラーが含まれている可能性があります。このため、完全な軌道を抽出して測定ノイズを除去するには、ある程度のデータ処理が必要です。

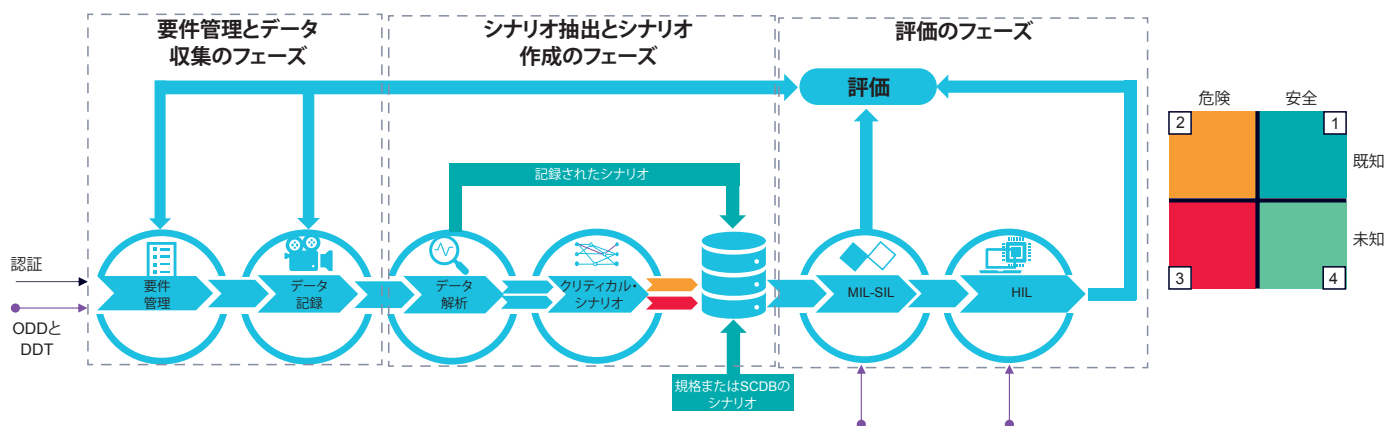


図2 SOTIFシナリオ (右) とADAS/AVシステムのV&V用のシーメンスの自動ツールチェーン (左)。緑の矢印は、既知の安全なシナリオを示し、オレンジと赤の矢印はそれぞれ既知の危険なシナリオと、未知の危険なシナリオを示しています。紫の矢印は、さまざまなツールへのODDとDDTの入力を示しています。

シナリオの抽出と作成

Simcenter Autonomy Data AnalysisとCSCを含むシーメンスのツールチェーンを使用すると、SOTIF要件に従ってすべてのカテゴリーのシナリオを簡単に抽出できます。

データ解析

Simcenter Autonomy Data Analysisは、記録された生データを解析し、次の機能を提供します (図3を参照)。

- 環境の認識アルゴリズムでシナリオを抽出して再生

- シナリオを分類し、主要業績評価指標 (KPI) に基づいて評価
- 分類されたシナリオの詳細を掘り下げ、関心のあるデータを手動で選択
- OpenDriveおよびOpenScenarioを介して、再生またはシミュレーション用に生データをエクスポート (シミュレーション・モデルの検証を含む)

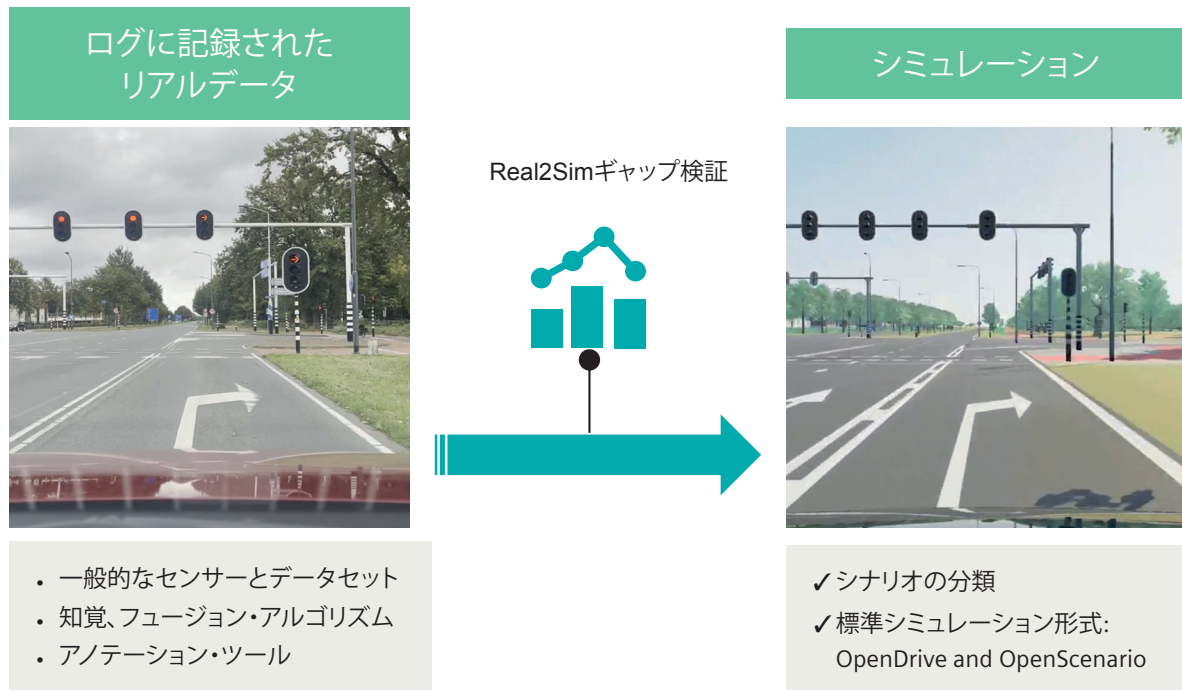


図3 リアルデータ解析と仮想化のReal2Simプロセス。検証コンポーネントは、専用のメトリクスでReal-Simのギャップを定量化し、高性能のシミュレーション・モデルを保証します。

クリティカル・シナリオの作成

クリティカル・シナリオの作成は、2つの方法でシナリオ生成プロセスに貢献します。まず、前ステップのSimcenter Autonomy Data Analysisソリューションを使用して抽出した既知の安全なシナリオの重大度を最適化することで、既知の危険なシナリオ（図2のオレンジの矢印を参照）を生成する機能を提供します。

次に、未知の危険なシナリオ（図2の赤の矢印を参照）を生成するツールを提供します。図4は、ツールの3つの主要ステップを示しており、こちらで簡単に説明されています（ツールの詳細は、文書「[SOTIFの未知の危険なシナリオを作成するための体系的なアプローチ: 最適化ベースの手法](#)」を参照してください）。⁶

抽出

フィーチャー抽出は、シーン内のアクター（車など）の動作を記述できる有限のフィーチャー・セットを提供します。アクターの動作のフィーチャーを抽出するために、道路のレイアウトをグラフで記述し、各パラメーターとノードの組み合わせの確率分布を決定します。

式1では、 $P_{a,i}$ はアクター i の特定の動作の確率であり、次のように計算されます。

$$P_{a,i} = P_{p,i} \times \prod_{j=1}^m P_{par,j}$$

式1

さらに、式1の m はアクター i について抽出されたパラメーターの数、収集されたデータから集計した $P_{par,j}$ の確率、 $P_{p,i}$ はアクタータイプ i のパスクラスターの確率です。

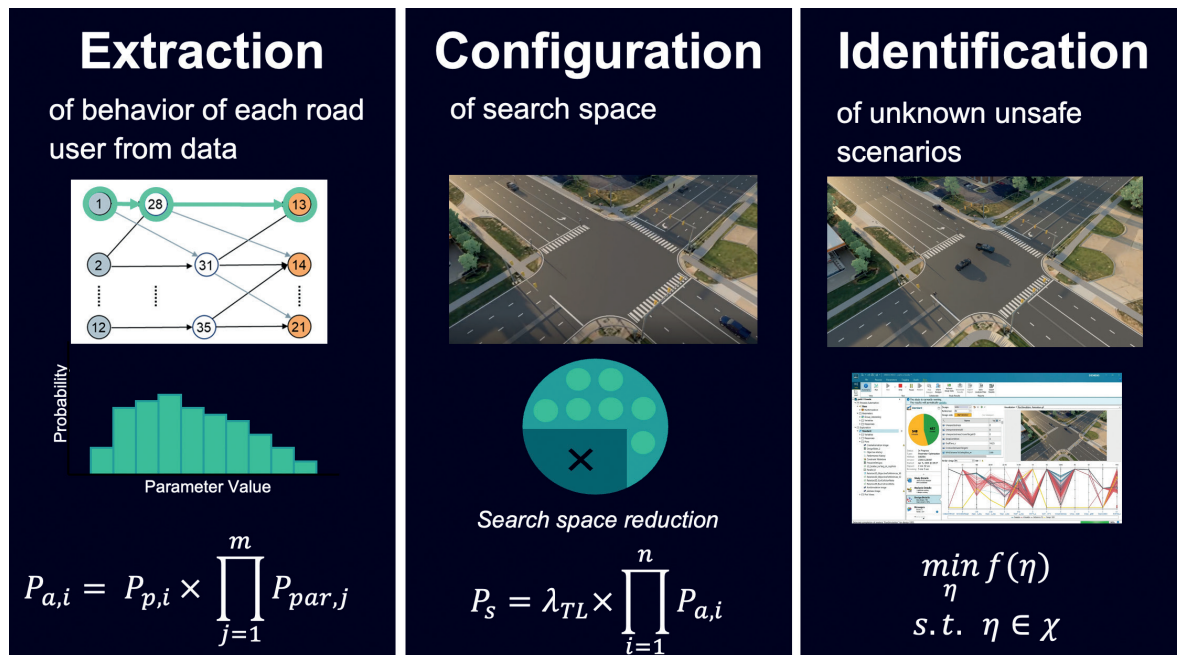


図4 クリティカル・シナリオ作成の3つの主要ステップ。

構成

最適化を効率化するために、アクターの動作とパラメーターを設定して検索領域を定義します。しかし、あらゆる可能性を考慮すると、大きくて手に負えない領域になってしまいます。相互作用しないアクターのパスとパラメーターを自動的に識別した後、離散パラメーターに基づいて残りの領域を分割します。これにより、管理可能な最適化スタディが作成されます。

識別 (ID)

識別ステップでは、独自の指標を使用してリスクの深刻度を評価し、重大度と新規性を評価します。最適化アルゴリズムを使用して、潜在的な影響が最も大きいシナリオを識別します。式2のように、目的関数には3つの項が含まれます。1: 未知のシナリオを識別する、独自の不測性のメトリクス $\epsilon(\eta)$ 。 η はシナリオ・パラメーター (アクターの速度、距離など) を表現 (上記の目的関数に定数値2を加えて、値が負にならないようにする)、2: シナリオの安全性を測定するTime-To-Collision (TTC)、3: シナリオの確率の関数 ($G(P_s)$) です。

$$f(\eta) = G(P_s(\eta)) \times (2 - \epsilon(\eta) + TTC_{\min}(\eta))$$

式2

式3は、 P_s を計算する方法を示し、 λ_{TL} は信号機の係数で、アクターが信号機のスケジュールに従う確率を示します。

$$P_s = \lambda_{TL} \times \prod_{i=1}^n P_{a,i}$$

式3

最適化問題は式4で形式化できます。 χ はパラメーター値の境界を定義し、 ζ_{col} は客体車両の衝突のケースのブール変数です。

$$\begin{aligned} \min_{\eta} f(\eta) \\ \text{s.t. } \eta \in \chi \\ \zeta_{col} = 0 \end{aligned}$$

式4

標準シナリオ

評価では、さまざまなシナリオ・データベース (規格のシナリオ・データベース、専門家が定義するODDに基づくシナリオ、クリティカル・シナリオ、事故データベースなど) が使用されます。ADASシステムの場合、EURO NCAP、UN R131 (AEBS)、UN R152 (AEBS)、UN R157 (ALKS) でテストシナリオを定義します。AVの場合、ISO 22737やISO/DIS 23374-1などの国際標準化機構 (ISO) 規格でテストシナリオを定義します。シーメンスのツールチェーンを使用すると、路上テストの前に、これらのシナリオを仮想化してテストできます。規格は安全性と性能のベースラインを提供しますが、多くの場合、専門家によって定義された追加の要件が、開発中および展開後に必要になります。

評価

データベースから収集されたすべてのシナリオがテストされ、多様で複雑な条件下でのデジタルツインの動作が明らかになります。仮想から物理へ移行して、電子制御ユニット (ECU) に組み込まれたAVシステムに対して究極のテストを実行します。この移行プロセスは、SIL、HILと呼ばれる (少なくとも) 2つのステップで実行されます。

ソフトウェア・イン・ザ・ループ (SiL) テスト

AV制御ソフトウェアの設計では、Sense-Plan-Act (認知、判断、操作) パラダイムで、知覚、計画、制御アルゴリズムを開発します。各チームは、他の2つのコンポーネントの簡略化されたモデルを開発し、これらを統合して完全なソフトウェア・スタックを作成します。テストは、ビークル・ダイナミクス、センサーモデル、インフラストラクチャ・シミュレーションを備えた仮想環境で行います。AVの現実的なシナリオを作成するために、シミュレーションされたセンサーの読み取り値を実環境の機能に一致させる必要があるため、この統合では、特にセンサーモデルの品質に関する課題が生じます。

ハードウェア・イン・ザ・ループ (HiL) テスト

車両に物理的に展開する前の最後のステップでHILを行い、目的のハードウェア・プラットフォームで先進運転システム・ソフトウェアをリアルタイムに実行してテストします。これにより、選択したシナリオに対する先進運転システムの応答を評価できます。

さらに、同じ仮想環境を使用してSILテストを行い、追加の重要要件をリアルタイムで実行します。ただし、実際の車両に展開されるのとまったく同じプラットフォームなので、このリアルタイムのハードウェア・プラットフォームには、特定の (多くの場合はセンサーに依存する) 通信プロトコルを満たすセンサー入力も必要です。したがって、シミュレーション環境は、シミュレーションされたセンサー信号をこれらの形式で出力する必要があります。シミュレーション・ハードウェアは、テスト対象のAVシステムのセンサー要件に基づいて拡張できることに注意してください。

たとえば、図5はHILのセットアップを示していますが、これは2台のカメラと1台のLiDARで構成される限定的なセンサーセットを想定しています。この環境には、ビークル・ダイナミクスとセンサーモデルが含まれています。これらの高忠実度モデルは計算コストが高いため、フェデレーション・アーキテクチャに実装することも可能です。カメラモデルは、固定リンクレート (GMSL2) で動作する専用のパケットベースのプロトコルでデータを出力しますが、LiDARは、ネットワーク・インターフェース・コントローラー (NIC) で実装される標準のユーザー・データグラム・プロトコル (UDP) を使用します。その結果、制御システムのECUは、物理的に受けるのと同じようにデータを受信します。

リアルタイムの性能を評価した後、前の評価に基づいてデータ記録計画を更新して、実環境での運転の予測不可能性に対する準備性を確保することができます。

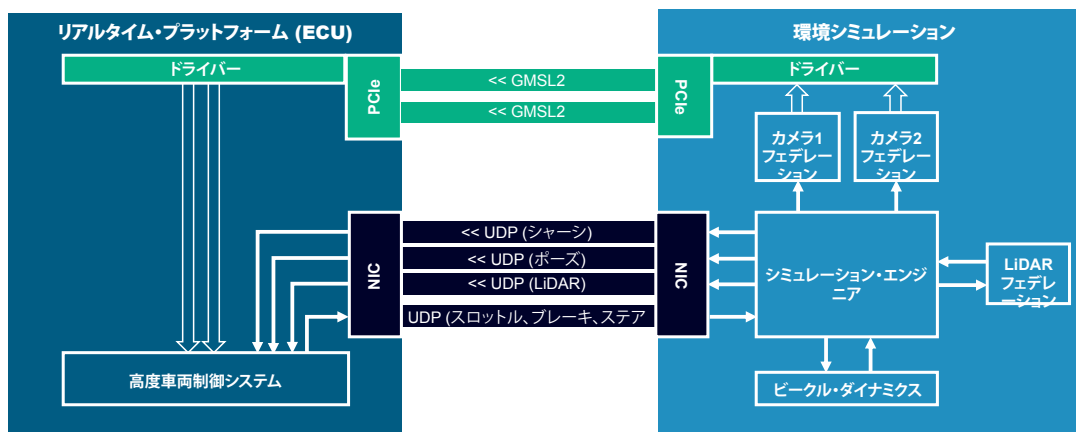


図5 2台のカメラと1台のLiDARの限定的なセンサー・スイートで構成されるHILアーキテクチャ。

まとめ

シーメンスの自動ツールチェーンを使用すると、安全性と信頼性を確保しながらAVの展開を加速する包括的なソリューションが提供されます。SOTIF規格に従って危険なシナリオを明らかにすることにより、ツールチェーンは、次のことを可能にします。

- 堅牢なテスト手法を使用してAVの展開を加速
- シナリオのカバレッジを拡大することでシステムの堅牢性を強化
- システム性能の信頼性を高めて内部および規則のKPIを達成
- 検証プロセスを効率化して開発コストを削減

全体として、シーメンスのツールチェーンを活用することで、SOTIFシナリオの3つの主要領域をカバーするシームレスでスケーラブルなアプローチが可能になります。これにより、安全性と信頼性を優先しながらAVを輸送システムに広く統合する道が開きます。

参考文献

1. UNECE The New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM), unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE-TRANS-WP.29-2022-58.pdf, consulted in November 2023.
2. UNECE Guidelines and Recommendations Concerning Safety Requirements for Automated Driving Systems [WP.29-187-10e.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE-TRANS-WP.29-187-10e.pdf) (unece.org), consulted in November 2023.
3. EU-REGULATION (EU) 2019/2144 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R2144&from=EN, consulted in November 2023.
4. EU-2022/1426 - COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2022/1426, [Publications Office \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1426&from=EN), consulted in November 2023.
5. GSR2: New rules to improve road safety and enable fully driverless vehicles in the EU, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_4312
6. Singh, T., Van Hassel, E., Sheorey, A. and Alirezadei, M., "A systematic approach for creation of SOTIF's unknown unsafe scenarios: An optimization based method", SAE Technical Paper, 2024.

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

北米・中南米: 1 800 498 5351

ヨーロッパ・中東・アフリカ: 00 800 70002222

アジア・太平洋: 001 800 03061910

その他のお問い合わせ先は[こちら](#)をご覧ください。

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアは、Siemens Xceleratorビジネス・プラットフォームのソフトウェア、ハードウェア、サービスを最大限に活用し、あらゆる規模の組織がデジタル・トランスフォーメーションを実現する支援をします。シーメンスのソフトウェアと総合的なデジタルツインにより、企業は設計、エンジニアリング、および製造プロセスを最適化し、現在のアイデアを将来の持続可能な製品に転換できるようになります。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアは、チップからシステム全体、そして製品からプロセスに至るまで、あらゆる産業において変革を加速させます。
[Siemens Digital Industries Software](#) – Accelerating transformation.

著者について

Tajinder Singhは、2021年にアイントホーフェン工科大学で自動車技術の修士（理学）を、2019年には名古屋大学で自動車工学の学士号を取得しています。現在は、オランダのシーメンスインダストリーソフトウェアB.V. でADAS/AVの仮想検証・妥当性確認の研究開発エンジニアを務め、未知の危険なシナリオの識別やハードウェア・イン・ザ・ループ（HiL）テストなど、さまざまなトピックを調査しています。



Son Tong博士は、シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアのADAS研究開発マネージャーです。自動運転とAIエンジニアリングのトピックに取り組む研究エンジニアと産業博士のチームを率いています。これ以前には、ルーヴェン・カトリック大学でEUのMarie Curieフェローとして制御システムの博士号を取得しています。またSon Tong博士は、シーメンスと欧州連合（EU）、ベルギーの研究プログラムで、技術コーディネーターとして活躍しています。シーメンスの「PL発明オブザイヤー賞」を受賞しました。



Jeroen Ploegは、1988年にオランダ、デルフトのデルフト工科大学で機械工学の修士（理学）を、2014年にはオランダ、アイントホーフェンのアイントホーフェン工科大学で車両プラットフォームの制御に関する機械工学の博士号を取得しています。Jeroen Ploegは、自動運転車の検証・妥当性確認の分野のフェロー・サイエンティストです。



Alexandru Forraiは、シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアのフェロー・サイエンティストです。自動運転システムの安全性保証とシナリオベースの検証・妥当性確認を研究しています。数々の科学論文を発表し、複数の特許を保持するAlexandru Forraiは、2012年にSpringerから出版された本「組み込み制御システム設計 - モデルベース・アプローチ」の著者でもあります。



Mohsen Alirezaeiは、2011年に機械工学、ロボット工学、制御の博士号を取得し、2012年にはデルフト工科大学のポスドク研究員を務めました。現在は、ヘルモントにあるシーメンスインダストリーソフトウェア&サービスのフェロー・サイエンティストであり、オランダ、アイントホーフェン工科大学では非常勤の助教授も務めています。研究対象は、自動運転、協調型自動運転、先進運転支援システムの検証・妥当性確認です。



[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2024 Siemens. 関連するシーメンスの商標は[こちら](#)に記載されています。その他の商標はそれぞれの所有者に帰属します。

86168-D4-JA 1/25 LOC