

AIによる検証空間最適化により、カバレッジ・クロージャを高速化

著者

Taruna Reddy

スタッフ・プロダクト・マーケティング・マネージャー

Will Chen

プリンシパル・アプリケーション・エンジニア

Badri Gopalan

シノプシス・サイエンティスト

はじめに

カバレッジは、現代の半導体検証の中核をなします。このプロセスにおいて、「動作していなければ、検証していない」という言葉ほど基本的な格言はありません。チップ設計の特定の側面をカバーしたからといって、すべてのバグが発見されるとは限りません。バグの影響伝播やチェッカーの品質も重要な要素ですが、動作していないロジックでバグが発生することはありません。カバレッジはバグを発見するための代替手段とみなされることが多いため、シミュレーションベースのテストを用いた検証では重要な焦点となります。

現在でも手書きのダイレクトテストが限定的な役割を果たすことがありますが、ほとんどのシミュレーションテストでは、制約付きのランダムスティミュラスを使用しています。これらのテストと検証された設計箇所との間には明確な相関関係がないため、この関係を確立するためにはカバレッジが重要です。検証が本当の意味で完了することはありませんが、カバレッジ指標は、十分な反復テストが実行され、設計がテープアウトできるほど十分に検証されていると判断する際の重要な指針になります。

制約付きランダムテストの自動化は利点が多いものの、目標カバレッジへの収束には時間がかかり、シミュレーションを続ければ続けるほどカバレッジの向上は少なくなります。このため、マニュアル作業がかなり必要となります。半導体業界では、カバレッジ・クロージャを「シフトレフト」し、最終的なカバレッジ結果を改善する、より優れた自動化方法を必要としています。

人工知能と機械学習 (AI/ML) を用いた Intelligent Coverage Optimization (ICO) はシノプシス VCS シミュレータに搭載され、スティミュラスの多様性を高め、テストベンチのバグを発見し、カバレッジを改善することで、これらの課題を解決しました。ICO を補完するために、シノプシス VCS は近年、AI/ML も活用しながら、微細レベル及び粗粒レベルで、より直接的にカバレッジをターゲットとしたシノプシス Verification Space Optimization (VSO.ai) を発表しました。シノプシス VSO.ai が、このホワイトペーパーの焦点となっています。

カバレッジ収束における課題

シミュレーションにおけるカバレッジの基本的な考え方は十分単純です。検証チームは、対象となる構造的なコード・カバレッジ指標（行、式、ブロックなど）を選択することで、シミュレーションのテスト実行時に自動的に追加されます。エンジニアは通常、機能的なカバレッジ・ポイントとグループを追加定義し、確実に実行されるように設計の一部を定義します。また、特定のカバレッジ・ポイントの組み合わせを監視するために、クロス・カバレッジを定義することもあります。

次に、自動生成されたスティミュラスが、規則の範囲内に収まるよう制約を定義し、シミュレーションの実行を開始します。各テストの反復により、規則に従った制約付きのランダムスティミュラスが生成されると、シミュレータは指定された全ての形式のカバレッジ指標を収集します。チームは結果を監視し、カバレッジの結果を改善するために、より多くのテストを実行したり、制約を調整したりします。そして、ある時点で、チップのプロジェクトのスケジュールとリソース制約の中で、最善を尽くしたと判断し、テープアウトします。

一見簡単そうに見えますが、図1は、このプロセスを実際のチップ設計に適用した場合に発生する課題を示しています。

一つ目の大きな課題は、カバレッジ定義です。大規模で複雑な設計に対して、包括的なカバレッジを定義することは不可能だからです。

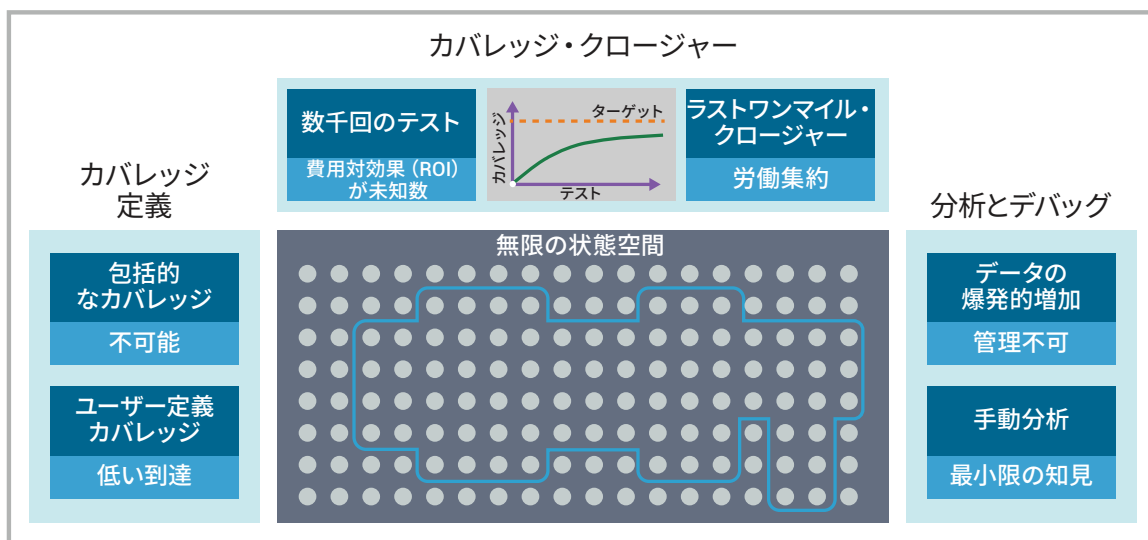


図1: シミュレーションにおけるカバレッジ活用の課題

コード・カバレッジは設計の意図した機能を反映していないため、ユーザー定義カバレッジも重要な役割を果たします。しかし、これは手作業であり、一般的に設計の動作の限定的な割合しか含んでいません。シミュレーションテストに、構造的カバレッジと機能的カバレッジのどのような組み合わせが含まれていても、そのカバレッジ範囲を狭めて検証目標に合致した指標を達成することは、より大きな課題となります。

図1の中央上部のグラフは、事実上全てのプロジェクトで起こることを示しています。最初のテスト実行では、設計の多くの部分が実施されます。制約付きのランダムテストを繰り返すことで、時間の経過とともにカバレッジが改善されていきます。一般的なチップのプロジェクトでは、何千回もの制約付きランダムシミュレーションテストが実行され、設計には大量の反復作業が含まれています。そのため、新たなカバレッジの発生率は劇的に小さくなり、シミュレーションの実行回数を増やすたびに費用対効果 (ROI) が時間と共に低下していきます。ROIの低下は、カバレッジ・クロージャーにおける二つ目大きな課題となります。

ある時点でカーブは平坦になり、無限にシミュレーションを行ってもほとんど改善されません。検証チームは、テープアウトするのに十分なカバレッジが達成されたことを判断しなければなりません。この漸近的な収束が起こるとき、カバレッジ指標が100%になることはありません。これが、プロジェクト目標がより低くなる理由の1つです。残念ながら、カーブの平坦化は目標が達成される前に起こることが多い傾向にあります。検証チームは、何が起きているのかを把握し、時間とリソースの許す限りカバレッジを向上させるよう努めなければなりません。自動化されたテストを増やすだけでは不十分であることが多く、手作業による多大な作業が必要となります。

シミュレーション終了プロセスの「ラストワンマイル」は、三つ目の大きな課題であり、二つの要因によって妨げられています。一つ目は、シミュレーションの実行によって収集されるデータ量が圧倒的に多いことです。二つ目の問題は、データを分析し、この構成ではイリガルなカバレッジ・ピンなのか、それとも真のカバレッジ・ホールなのか、カバレッジ・ホールの根本原因を判断することです。膨大なデータセットを手動分析しても、最小限の知見しか得られません。この状況を改善する唯一の方法は、より良いカバレッジを定義し、より少ないテストを実行し、より高い結果に素早く収束させ、分析工程を自動化することです。

シノプシス VSO.ai の導入

AI や ML の技術は、多くの産業で困難な問題に導入されており、チップ開発も例外ではありません。多くの電子設計自動化 (EDA) ツールは、タスクの自動化、スケジュールの改善、結果の最適化に AI/ML の適切な活用を開始しています。シノプシスは、AI/ML のチップ設計、検証、実装などへの応用において、EDA 業界の明確なリーダーです。特にシミュレーション・ベースのカバレッジ・クロージャの領域では、シノプシス VSO.ai はユニークで強力なソリューションとなります。

シノプシス VSO.ai の支援手法は多岐にわたりますが、図 2 では、図 1 に示した課題の対応関係を示しています。カバレッジ定義の課題に対しては、シノプシス VSO.ai は、ユーザー指定のカバレッジを補完するために、従来のコード・カバレッジを超えるいくつかの種類のカバレッジを推論します。ML は経験から学習し、適切な箇所に対してインテリジェントにカバレッジの再利用が可能で、1 つのプロジェクトにおいても、初期のカバレッジ結果より学習したことが、カバレッジ・モデルの改善に役立ちます。

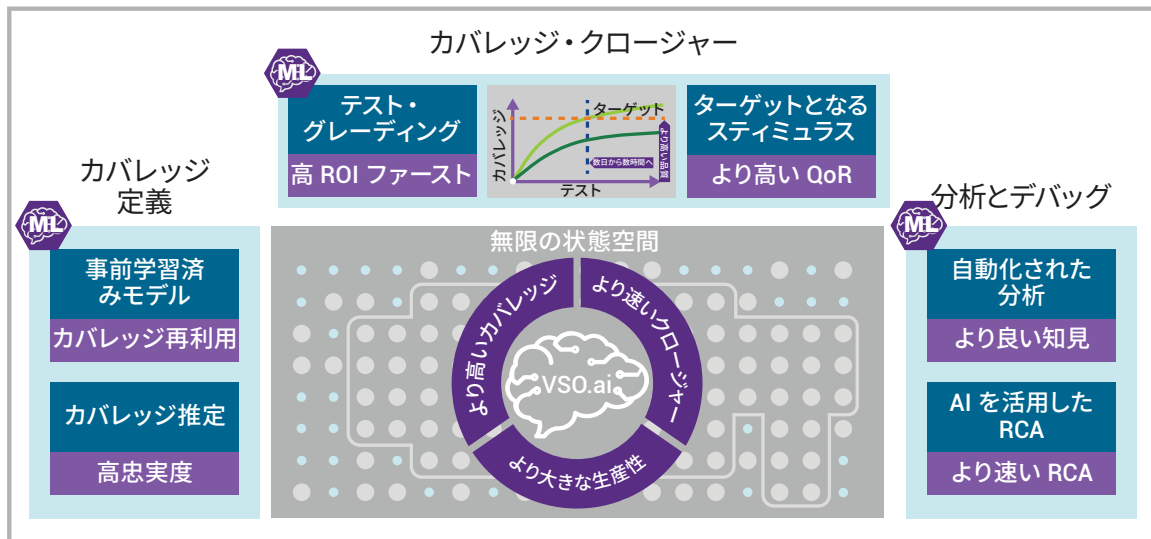


図 2: シミュレーションにおけるカバレッジの AI/ML による改善

ROI の低下という課題に取り組むために、より優れたテスト・シミュレーションを実行するプロセスは、おそらく ML が最も役立つ自然な場所です。前述したように、多くのテストは反復的であり、カバレッジ指標の改善はほとんどありません。プロジェクトの過程で、設計、カバレッジ、制約の進化によって、この順位が何度も変わる可能性があるため、手作業によるリグレッション最適化は脆弱です。これらの変更を手作業で組み込むことは現実的ではありませんが、シノプシス VSO.ai は粗粒度のテスト・レベルで動作し、結果の変化に応じて学習する自動化された適応型テスト最適化を提供します。冗長なテストを排除しながら、ROI が最も高いテストを最初に実行することで、カバレッジ・クロージャーを加速し、コンピュータ・リソースを節約することができます。

また、シノプシス VSO.ai はシミュレータ内の微細レベルで動作し、制約付きのランダムステイミュラスに適応させることで、未実施のカバレッジ・ポイントをより的確にターゲットし、テストの QoR (結果の質) を向上させることができます。これにより、カバレッジ・クロージャーを加速させるだけでなく、より高いパーセンテージへの収束も促進されます。

ラストワンマイル・クロージャーの課題は、カバレッジ結果の AI 主導の分析による自動化により解決されます。シノプシス VSO.ai は根本原因分析 (RCA) を実行し、制約の衝突などにより特定のカバレッジ・ポイントに到達しない理由を判断できます。シノプシス VSO.ai は自ら状況を解決できる場合は解決し、そうでない場合は衝突する制約の特定など、実用的な結果を検証エンジニアに提示します。

シノプシス VCS との統合

EDA ソリューションに AI/ML 技術を効果的に導入するには、従来のツールとの緊密な統合が必要です。シノプシス VSO.ai も例外ではなく、シノプシス VCS との緊密な統合により独自の優位性を実現しています。図 3 は、シノプシス VCS を使用してテストを実行し、カバレッジを収集する従来のマニュアルフローを示したものです。

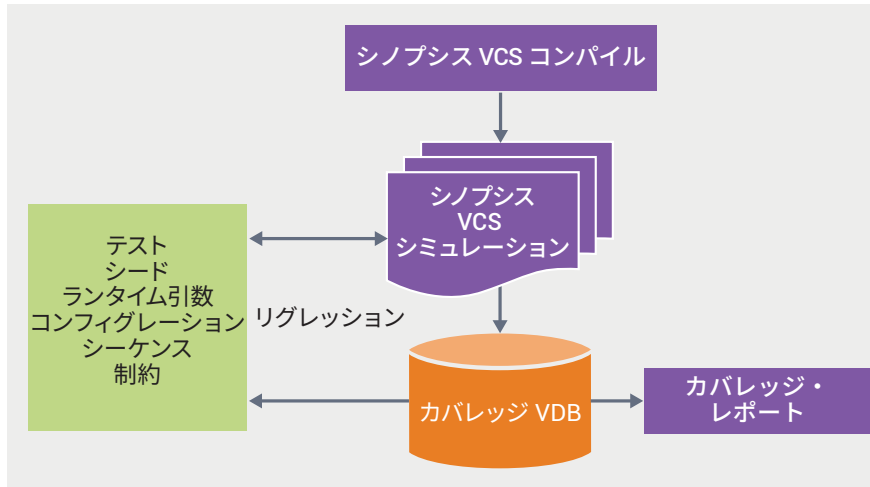


図3: マニュアルシミュレーション・テスト・フロー

設計と検証環境 (テストベンチ) がコンパイルされ、シミュレーションは実行されます。制約の他にも、検証チームが指定できる情報がいくつかあります。これには、さまざまな設定スイッチやランタイム引数が含まれます。テストが実行されると、カバレッジ指標が検証データベース (VDB) に保存されます。結果はカバレッジ・レポートの形で見ることができ、複数のテストのデータベースを統合したサマリー・レポートを作成することも可能です。

一方、図 4 は、シノプシス VSO.ai を使用していくつかの重要なステップを自動化することで、このフローがどう強化されたかを示しています。カバレッジ推論ステップはコンパイル時に行われ、構造的カバレッジとユーザー指定カバレッジを自動生成カバレッジで補完します。また、微細レベルでは、シノプシス VCS の制約ソルバーは、カバレッジによって指示されるため、未到達のカバレッジ・ポイントにヒットする新しいテストをより正確に生成することが可能です。ソルバーがシミュレータの根幹部分にあることが、緊密な統合が重要である理由の 1 つです。

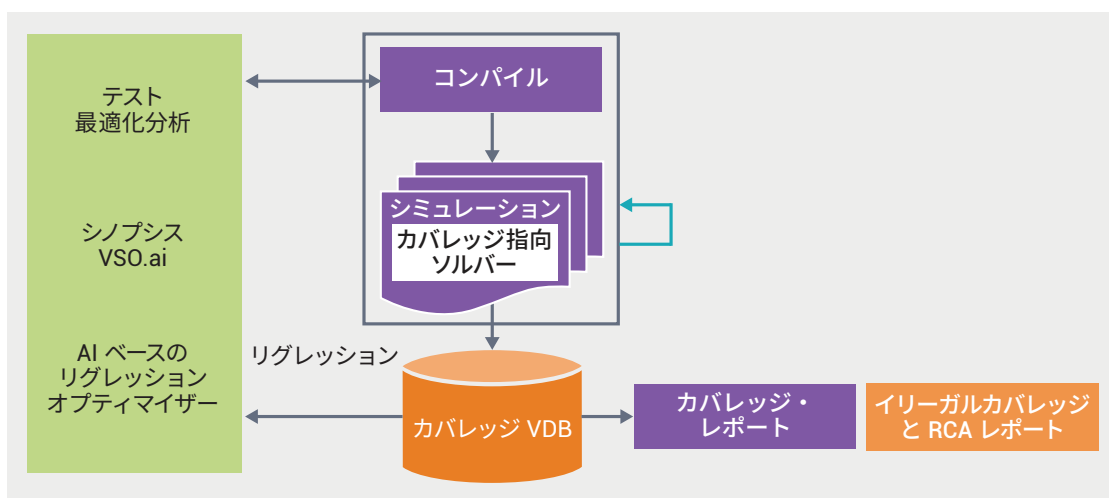


図 4: シノプシス VSO.ai によるシミュレーション・テスト・フロー

テスト順位に基づく手動によるテストの順序付けややりくりは、完全に自動化されたフローに置き換えられます。粗粒度レベルでは、シノプシス VSO.ai は最小限のテストセットで最大限の ROI を得るためにリグレッションを整理し、ランタイムとコンピュート・リソースを節約します。また、シノプシス VCS の設定やスイッチを制御して、各テスト実行を最適化することができます。同様に、カバレッジ結果の手動分析は、RCA によって補完され、到達できない可能性のあるカバレッジを特定し、これらの状況を解決するための根本原因を報告します。

より高いカバレッジが要求されない場合、VSO.ai は同等のカバレッジ結果をはるかに短時間で得ることができます。多くの場合、シノプシス VSO.ai は、図 5 に示すように、ML 技術を使用して時間の経過とともにカバレッジを向上させます。実行ごとに新しい情報が提供され、制約の解決やリグレッションテストの最適化が行われます。手動によるアプローチとは異なり、このフローはチップのプロジェクトの過程で変化する結果に完全に適応します。ML は、現在のリグレッション実行、プロジェクトでの過去のリグレッション実行、更に類似の過去プロジェクトで実行されたシミュレーションの履歴を使用できます。

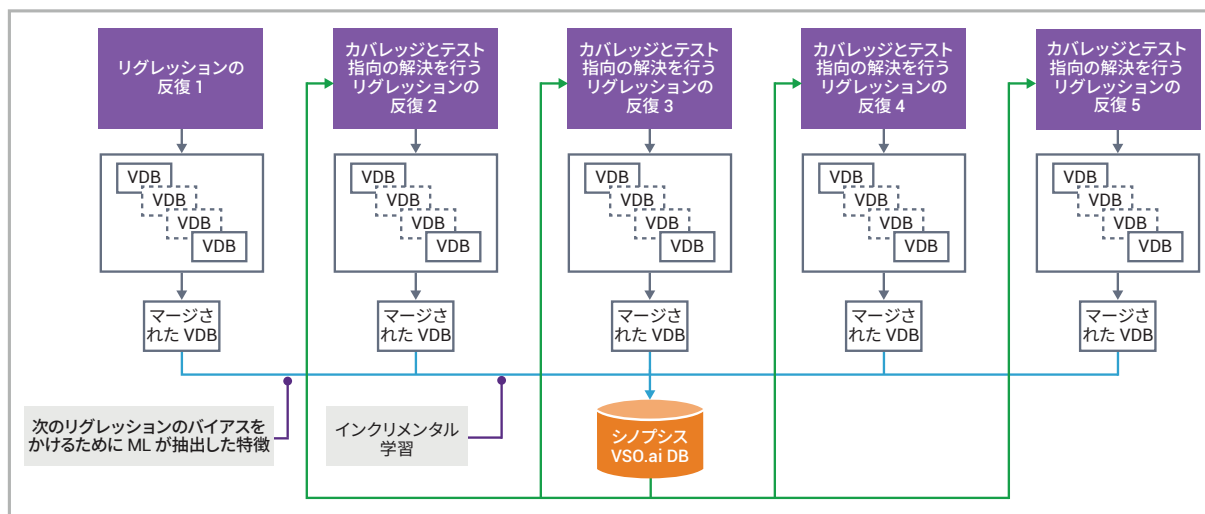


図 5: シノプシス VSO.ai がどのように ML を使用してリグレッションを改善するか

シノプシス VSO.ai は、新しい変更の有無にかかわらず、完全なリグレッションのサブセットを実行する開発段階でも役立ち、ユーザーまたはツール定義の指標で測定される検証品質を保証します。この場合のメリットは、同じまたは類似のカバレッジ・レベルに速く到達する TTR の高速化です。

シノプシス VSO.ai の結果

シノプシス VSO.ai は、シミュレーションのリグレッションを最適化することで、同じカバレッジをより短時間で達成し、必要に応じてカバレッジを向上させます。例えば、あるお客様が、最近のシノプシス・ユーザー・グループ (SNUG) のイベントで発表されたように、4 つの IP ブロックのリグレッションテスト数を少なくとも 2 倍削減することに成功しました。図 6 に示す別の例では、VSO.ai は OpenTitan HMAC の知的財産 (IP) ブロックにおいて、100% の機能カバレッジを達成するためのテスト数を 3 倍削減することを達成しました。

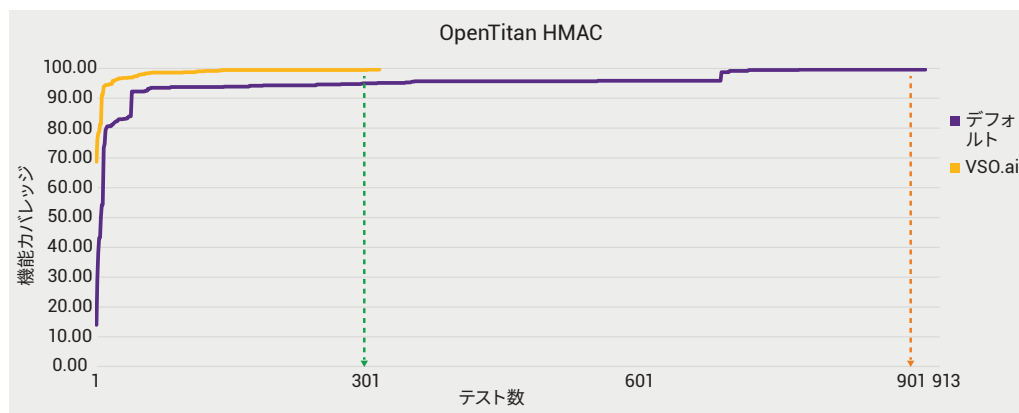


図 6: OpenTitan HMAC におけるシノプシス VSO.ai の結果

IP ブロックとシステムオンチップ (SoC) 設計の両者の幅広い経験から、目覚ましい結果が得られました。リグレッションカバレッジの最適化とカバレッジ指向の解決により、カバレッジ目標達成までの時間が 1.5~10 倍短縮され、カバレッジ結果が 10% も向上しました。通常、カバレッジ・ビンの 5~20% は RCA により到達できない可能性があると認識されています。シノプシス VCO.ai の価値は明白であり否定できません。

まとめ

カバレッジはバグを発見するための手段としては、まだ不完全であり、カバレッジ・クロージャの課題に対処するための確実な方法はありません。EDA の他の多くの分野と同様に、AI/ML 技術は救済をもたらします。シノプシス VCS と VSO.ai の組み合わせは、リグレッションとカバレッジ・クロージャーを加速するための業界で最も革新的かつ完全なソリューションです。