

Title	モニタベース手法を用いたオン・チップ・バスプロトコルの機能検証に関する研究
Author(s)	垣内, 洋介
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/47283
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	かき うち よう すけ 垣 内 洋 介
博士の専攻分野の名称	博 士 (情報科学)
学位記番号	第 2 1 3 2 5 号
学位授与年月日	平成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 情報科学研究科バイオ情報工学専攻
学位論文名	モニタベース手法を用いたオン・チップ・バスプロトコルの機能検証に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 柏原 敏伸 (副査) 教授 松田 秀雄 教授 清水 浩 教授 四方 哲也 助教授 岡野 浩三

論 文 内 容 の 要 旨

LSI の微細化、集積化に伴い、システム全体を 1 つのチップで実現する、システム・オン・チップ (System-on-Chip ; SoC) 設計が広く普及している。SoC 設計では、システム中の一部に既設計のモジュールを再利用することで、新たに回路を設計、検証する際のコストを軽減している。このような複数の機能モジュールで構成されるシステムを正しく動作させるためには、各モジュールの機能検証だけでなく、モジュール間のデータ転送が正しく行われるかどうかについての検証を行う必要がある。SoC 設計においては、モジュール間のデータ転送にはチップの面積効率の点から共有のバスラインを用いたオン・チップ・バスプロトコルと呼ばれるデータ転送の手順に従った通信が一般的である。オン・チップ・バスプロトコルに則ってシステム中の各モジュールがデータ通信を行うようなシステムの場合、モジュールのインターフェース部の設計がバスプロトコルに従って動作するかどうかを検証することで、モジュール間のデータ通信の正しさを保証することができる。

本研究ではモジュールインターフェースの機能検証手法のうちモニタベース検証に焦点を当てている。モニタベース検証は、検証対象とは別にモニタと呼ばれる回路を設け、モジュールのインターフェースに現れる入出力信号値を取り込み、監視を行う。モニタはモジュールのインターフェースが仕様でない動作を行った場合、それを検知しエラー信号を出力する。このようなモニタは仕様全体を 1 つの回路として実装するため、仕様全体についての検証に向くが、人手で設計しなければならなかったため、誤りの混入や検証コストの増大を招いていた。

そこで、本研究ではモニタベース手法を用いて、より効率的にオン・チップ・バスプロトコルやモジュールインターフェースを検証する手法を提案する。まず、AMBA や VCI など現在提唱されている複数のオン・チップ・バスプロトコル規格を調査し、並列同期動作・スプリットトランザクション・パイプライントランザクション・バースト転送といった、各規格に共通して含まれる特徴的な動作について述べる。次に、それらの動作を表現可能なモデルを提案し、計算機で取り扱えるよう定式化した。提案するモデルではユーザ定義の変数を取り扱えるよう拡張された有限状態機械 (Finite State Machine ; FSM) とプロセスキューが複数並列に動作する。さらに、このモデルをもとに、プ

ロパティ・チェックングにより部分的ではあるが仕様の正しさを保証する。仕様が意図通りに記述されているか否かということは検証において非常に重要な問題であるが、本論文では「デッドロックに陥らないか」「全ての種類のデータ転送が実行可能であるか」という項目について、プロパティ・チェックングを用いて仕様の正しさを検証している。

そして、モデルからモニタを生成し、モニタベース手法を用いたシミュレーションおよび形式検証によって設計モジュールのバスプロトコルへの準拠性を検証する。シミュレーションにおいては、テストパターンが検証対象の動作をどれだけをカバーしたかということを知るためにカバレッジというメトリクスを用いることが一般的である。カバレッジには多数の種類が存在し、1つだけで完全に検証の進捗を測ることはできない。本論文では、その指標の1つとして、モニタの状態カバレッジを提案し、実験によってどのようにカバレッジの値が変化するかを示す。

形式検証においては、大規模なシステムを検証する場合、システム全体を形式検証で取り扱うには規模的に難しいことがある。このような場合は、モジュール単位で個別にインターフェースがバスプロトコルに従うかを検証するが、その際に、入力が問題となる。モジュール単体の検証では本来接続されていた入力が何も接続されていない状態となるが、形式検証ではこのような入力についてはすべての取り得るパターンを網羅的に調べてしまう。そのため、本来バスプロトコルで認められていない入力についての動作も調べてしまうことになる。このような正しくない入力を排除し、バスプロトコルで認められている入力パターンのみを調べるよう、入力には制約が設けられる。しかし、バスプロトコルにおける入力制約は複雑で、別途回路を設けなければならない場合もある。そこで、本研究では、モジュール単体を検証する場合に必要な入力制約を仕様から抽出してモニタに反映させ、別途入力制約を与えなくてもモジュール単体での検証が行えるようにする。そして、実際に実験を行い、モジュールのインターフェースがバスプロトコルに従うかどうかを検証する。

論文審査の結果の要旨

システム LSI の設計において、各モジュール間で正しくデータ通信を行えているかを効率的に検証することは大きな課題であり、既設計資産を再利用したとしてもデータ通信の検証に時間を費やすと、開発期間短縮という再利用の利点が失われることになる。本論文では、モジュール間のデータ通信の手順であるバスプロトコルに関する検証の効率の向上に貢献するものである。その主な成果を要約すると、次の通りである。

- (1) 複数のプロトコル規格に共通して含まれる性質を抽出し、それらを表現可能な動作モデルを定めている。具体的には、有限状態機械とプロセスキューによるモデルで、スプリット・トランザクションといったプロトコル特有の性質をキューによって自然にモデル化可能であることを示している。
- (2) 動作モデルをプロパティ・チェックングすることで、仕様記述自体に含まれる誤りを検出する手法を提案している。複雑なバスプロトコルにおいては、その仕様を記述する段階で、誤解や記述ミスなどにより誤りが混入することがあるが、この手法では、仕様記述自体を検証することで、そのような誤りを検出できる。
- (3) モニタの全状態に対してどれだけの状態に遷移済みであるかというモニタ FSM 状態カバレッジなるものを定義し、その有効性を確認している。シミュレーションにおける検証では、達成度を判断する指標としてカバレッジと呼ばれる数値を用いるが、ここで提案したモニタ FSM 状態カバレッジは一般的に用いられるコードカバレッジなどと比較して、シミュレーションの順序の影響を受けにくいことを実験により示している。
- (4) システム内の各モジュールは大抵の場合、プロトコルで定められた入力に対してのみ正しく動作することが要求されている。そのため、モジュール単体のインターフェース検証を行う場合には、プロトコルで定められた入力のみ

を取り扱うよう制約を別途設ける必要があるが、本論文ではモニタにこの制約を反映させる手法を提案し、それにより検証のコストを削減できる可能性を示している。

以上のように、本論文はオン・チップ・バスプロトコルの検証を効率化することでシステム LSI のモジュール化設計、既設計資産再利用設計の円滑化に貢献しているため、情報科学に寄与するところが大きい。よって、博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。