

## 論文内容の要旨

博士論文題目   Studies on Multi-Cycle Paths of Sequential Circuits  
(順序回路のマルチサイクルパスに関する研究)

申請者           中村 一博

(論文内容の要旨)

大規模半導体集積回路 (VLSI) の微細加工技術の進歩により、1つの VLSI チップに実装される論理回路が、益々、大規模かつ高速になっている。これに伴い、組合せ回路部分の最大遅延を正確に評価することが、回路の動作の正当性を保証し、高速動作を実現する上で重要になってきている。通常、順序回路のクロック周波数は、フリップフロップ間の組合せ回路のすべての経路が1クロックで信号を伝搬するものとして、経路の最大遅延によって決められる。しかし、回路によっては2クロック以上で信号を伝搬しても良いマルチサイクルパスを持つものがあり、上記の仮定は必ずしも正しくない。このようなマルチサイクルパスについては、これまでは、設計者が経験を基にして人手によって検出して、処理されることが多かった。回路の大規模化に伴い、効果の大きな自動化の要求が高まっている。

本論文では、マルチサイクルパスの定式化を行ない、マルチサイクルパスを機械的に検出する方法の提案を行っている。これに基づき、信号伝搬に費やせるクロック数を考慮したクロック周波数の決定やタイミング検証、論理回路の最適化についても述べている。

第1章では、このような問題の背景と、本論文の目的について述べている。

第2章では、まず、待ち状態によってガードされたフリップフロップ間のマルチサイクルパスに着目し、フリップフロップの値変化の間隔を基にマルチサイクルパスの定式化を行っている。それを基に、論理設計検証で広く用いられている二分決定グラフ (BDD) を用いた有限状態機械 (FSM) の記号実行手法の応用によりマルチサイクルパスを検出する手法を提案している。

第3章では、より大規模な回路のマルチサイクルパスの解析を可能にするために、論理式の充足可能性を判定する SAT アルゴリズムに基づくマルチサイクルパス解析手法を提案している。この解析法では、経路の組合せ論理式を和積形論理式 (CNF 式) に変換することが必要となるが、CNF 式のサイズを削減する手法も提案している。

第4章では、検出されたマルチサイクルパスを用いた正確なタイミング検証手法と、論理最適化について述べている。とくに、マルチサイクルパスを考慮することで、設計した半導体集積回路に要する面積の最適化が行えることを示している。

第5章は、本論文のまとめである。本論文で提案した方法が有効であることを結論している。

## (論文審査結果の要旨)

本論文は、大規模半導体集積回路 (VLSI) の設計と検証に関して、組み合わせ論理回路のマルチサイクルパスの解析と応用について研究したものである。マルチサイクルパスの定式化に基づいて、人手に頼っていた検出と処理を、機械的に行なう方法を提案している。本論文の主な成果は次のように要約される。

1. マルチサイクルパスの定式化を行ない、機械的に検出する方法の基盤を築いている。
2. マルチサイクルパスの検出法として、有限状態機械 (FSM) の記号実行手法を応用した手法を提案した。これは、二分決定グラフ (BDD) を用いて、FSM の初期状態から、状態空間の探索を行い、到達可能な状態集合を求め、各状態でのフリップフロップの値の変化を解析し、フリップフロップ間で信号伝搬に費せるクロック数を算出する方法である。この手法を、乱数生成回路と、ベンチマーク回路 (ISCAS89) に適用して、提案の有効性を示している。
3. より大規模な回路でのマルチサイクルパス解析を可能にするために、SAT アルゴリズムに基づく解析手法を提案した。この手法では、全ての状態が到達可能であると仮定しているので、すべてのマルチサイクルパスを抽出できるわけではない。しかし、二分決定グラフによる手法では対応できなかった大規模な回路にも適用できる。ベンチマーク回路 (ISCAS89) の大きなものや、自分達で設計・製作した音声認識回路などに適用して、そのことを示している。その中で、組合せ多段論理回路から CNF 式へ変換するときに、ヒューリスティックに中間変数を挿入して、CNF 式のサイズを削減する基準を導き出している。
4. 検出されたマルチサイクルパスは、正確なタイミング検証に応用すること、半導体集積回路の面積の削減に寄与することを示している。

このように、本研究の成果は、VLSI の設計と製作にあたって、今後、益々重要になるタイミング検証と省電力設計に有効に適用される。検出にはかなりの計算時間が掛かるが、大規模な回路にも対応できることを示しており、学術上、応用上寄与するところが多い。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。