

再構成可能アクセラレータにおける中間粒度ボディバイアス制御を用いた電力最適化

松下 悠亮[†] 奥原 颯[†] 増山 滉一朗[†] 藤田 悠[†] 天野 英晴[†]

慶應義塾大学理工学部情報工学科[†]

1. はじめに

我々が開発した粗粒度再構成可能アクセラレータ CMA に SOTB 技術を適用した CMA-SOTB[1]におけるボディバイアス制御は、PE-Array 全体で同じボディバイアスを印加して制御している。これは演算を行わない PE にも同じボディバイアスが印加されており余計にリーク電力を消費している。よって、PE-Array をドメイン毎に分割し、ドメインでボディバイアスを制御してリーク電力を削減する手法を提案する。

2. 提案手法

提案する手法は、各アプリケーションで演算に使用されない PE にリバースボディバイアス (RBB) を印加し、また、クリティカルパスと比較して遅延時間の短いパス内の演算を行う PE に、クリティカルパスの遅延時間と合わせるように RBB を印加することでリーク電力の削減を目指すという手法である。本稿で提案するボディバイアスのドメイン分割の概要を図 1 を用いて示す。図 1 は PE-Array の一部を示す。ここでは、MULT と Shift Left の演算を行うパスをクリティカルパスとして定義し、要求性能としてゼロバイアス時にクリティカルパスの遅延が要求する遅延時間を満たす限界を仮定する。

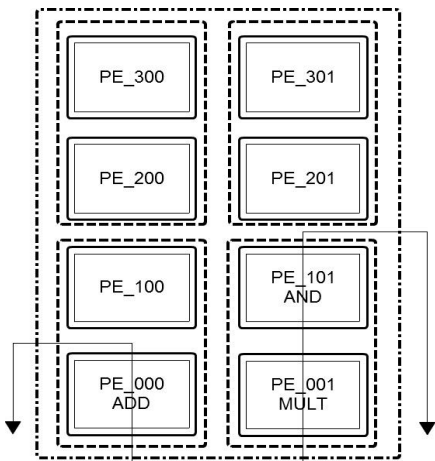


図 1 各粒度におけるボディバイアス制御

まず従来手法である PE-Array 全体にゼロバイアスを印加する場合を考える。この場合、演算を行わない PE が 5 つ存在するが、ゼロバイアスが印加されているため、リーク電力は多く消費されてしまっている。また、PE_000 を通過するパスも遅延時間が短いにも関わらずゼロバイアスが印加されているためリーク電力削減の余力を

残している。ここで、提案手法によるドメイン分割の例を示す。縦 x 横で 1x1(実線)、2x1(点線)、4x2(破線)でそれぞれ分割する例を考える。

- 1x1(実線)でドメイン分割する場合
 - PE_100, 200, 201, 300, 301 の 5 つがフローを通らず演算を行わないため RBB を最大限印加してリーク電力削減可能。また、MULT, SR のフローと比較して ADD のみのフローの遅延時間が短いことから PE_000 には遅延時間を合わせるように RBB を印加してリーク電力が削減できる。
- 2x1(点線)でドメイン分割する場合
 - PE_200, 201, 300, 301 の 4 つに最大限 RBB を印加できる。また、PE_000 と 100 が同ドメインであるため、1x1 の場合の PE_000 に印加した RBB を PE_100 に印加しなくてはならず、1x1 と比較して削減率は落ちる
- 4x2(破線)でドメイン分割する場合
 - ドメイン内にクリティカルパスが通過するため、全体にゼロバイアスが印加され、リーク電力は全く削減されない。

一方でこの手法の提案を行うにあたり、面積オーバーヘッドの増加が問題となる。これはボディバイアスをドメイン毎に分割すると、DRC エラーを回避するためドメイン間に一定の余白を空けなくてはならず面積オーバーヘッドが生じてしまうためである。よって、どのようなドメイン分割の粒度でどの程度ボディバイアスを印加すればリーク電力が最小化されるかを求める。

2.1. 最適化のためのアルゴリズム

PE-Array の各ドメインにどのように基板バイアスを印加していくかを求めるため、遺伝的アルゴリズムを用いる。以下の条件による非線形関数の最小値探索を行う。

- インプット: PE1 つあたりの各命令におけるバイアス時のリーク電力と遅延時間のテーブル、各アプリケーションのコンフィギュレーションデータ・PE-Array 内の演算フロー
 - 制約: 各フロー要求性能としてゼロバイアス時のクリティカルパスの遅延時間を超えない
 - 目標: PE-Array 全体のリーク電力が最小
- これらの条件を元に、クリティカルパスで要求する遅延時間を満たしつつ、インプットデータを参照し、PE-Array 内の各演算フローでリーク電力が最小になるようアルゴリズムを設計した。

2.2. 遅延テーブルの作成

前節のアルゴリズムを使用するにあたり、各命令の各ボディバイアスに対応したリーク電力と遅延時間を記載したテーブルを作成する必要がある。このテーブルは、PE 内部のクリティカルパスを使用し、入出力の立ち上がりの差異を遅延時間として記録する。

この遅延時間の評価基準を元に各命令においてボディバイアスを-1.0V から+0.4V まで 0.2V 毎の 8 段階でテーブルを作成する。作成にあたり、Synopsys 社の HSIM を用いてシミュレーションを行い、遅延時間を計測した。

3. 評価

3.1. 評価条件

本稿では、4 種類の画像処理アプリケーション alpha, sepia, af, gray を使用した。供給電圧は SOTB において標準の 0.55V に固定し、PE-Array のドメイン分割の粒度は縦 x 横で 1x1, 1x2, 2x1, 2x2, 2x4, 4x2, 4x4 の 7 種類を使用した。以上より、各アプリケーション各粒度において要求する遅延時間における最小のリーク電力を 2.1 章で提案したアルゴリズムを使用して評価した。

3.2. 面積オーバーヘッド

2 章の説明にある通り、上下左右に余白を空ける必要であるために生じる面積オーバーヘッドの議論が必要になる。故に本稿では[2]の方法を参考にして面積オーバーヘッドを算出する。面積オーバーヘッドの結果は図 2 のようになった。

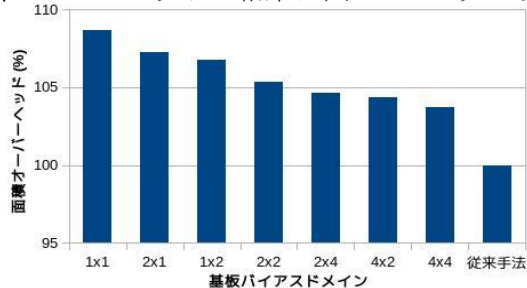


図 2 各粒度における面積オーバーヘッド

結果、粒度が最も高い 1x1 のドメイン分割でも 8.6%にすぎないことがわかった。

3.3. 評価結果

3.3.1. ドメイン分割粒度について

図 3 に各アプリケーションにおけるドメイン分割の粒度ごとのリーク電力削減率を示す。

この結果から、最も細かい粒度でのリーク電力の削減率は最大 72.1%、平均 50.4%を達成していることがわかる。一方で、4x4 など粒度の大きい分割ではリーク電力を削減できなかった。

3.3.2. 要求性能とリーク電力

図 4 に、ドメイン分割の粒度を 1x1 とし、ゼロバイアス時と+0.2V のボディバイアス時の要

求性能におけるリーク電力の削減効果を示す。

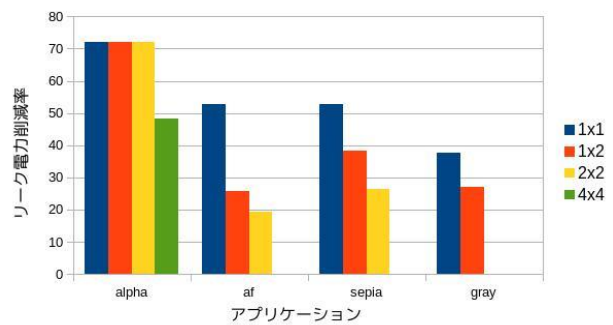


図 3 各粒度におけるリーク電力効果

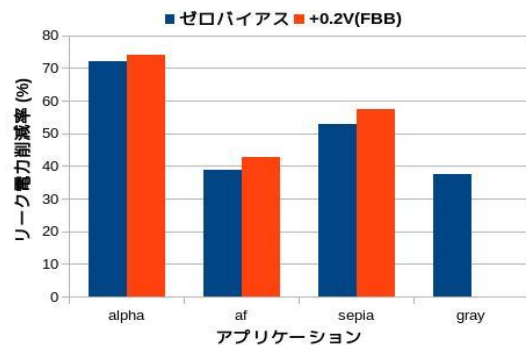


図 4 要求性能 vs リーク電力

ゼロバイアス時と比較して、af は 4.0%、sepia で 4.7%、alpha, gray でも微量ながら削減率は増加している。このことから、どのアプリケーションにおいても、要求性能が上がるほど本稿で提案するリーク電力の削減技術が活用できる。

4. おわりに

本稿では、PE-Array をドメイン分割してボディバイアス制御を行う手法を提案した。検討結果から、ドメイン分割の粒度の最も細かい 1x1 の場合に最大 72.1%、平均 50.4%リーク電力を削減できること、要求される性能が上がるほどリーク電力の削減率が大きくなることが分かった。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費(S)ビルディングブロック型計算システムに関する研究の助成を受けたものである。また、本研究は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、シノプシス株式会社、ルネサスエレクトロニクス株式会社の協力で行われたものである。また、本報告で提案したアルゴリズムの開発・設計は慶應義塾大学大学院博士課程・河野隆太氏の協力の元行われたものであり深く感謝する。

文 献

- [1] Hongliang Su et.al, "Body Bias Control for a Coarse Grained Reconfigurable Accelerator Implemented with Silicon on Thin BOX technology," Proceedings of Field Programmable Logic and Applications, pp.1-6, Sept 2014.
- [2] T.Kawakami et.al, "Optimization of the Body Bias Voltage Set(BBVS) for Flex Power FPGA," IEEE transactions on information and systems, vol.E90-D12, pp.1947-1955, Dec 2007.