

# 低消費電力リコンフィギュラブルプロセッサ Silent Mega Arrayのアーキテクチャ拡張に 関する研究

主任指導教員：近藤 正章 准教授  
指導教員：本多 弘樹 教授  
指導教員：小宮 常康 准教授

高性能コンピューティング学講座  
近藤研究室

0953015 中尾信高



# 研究の背景

- プロセッサの消費電力の減少が要求
  - バッテリーで駆動する携帯電話などの駆動時間延長の要求から電力削減が求められている
- プロセッサの消費電力と性能はトレードオフ
  - 低消費電力を目指すと、一般的に性能が低下
    - ・性能を補助するデバイスが必要
    - ・本研究ではこのデバイスをSMAとした



# Silent Mega Array

- SMA [1]

- 慶応大学、芝浦工大を中心に、科学技術振興機構(JST)のプロジェクトにて開発中のプロセッサ
- リコンフィギャラブル(再構成可能)プロセッサ
- 演算器アレイとしてPE(Processing Element)を64個所持

- DCT(離散コサイン変換)を低消費電力で処理することを初期目標として設計

- DCTの場合:92%のPE使用率 (64個中59個を演算で使用)
- 入力データに対して多くの演算を行うアプリケーションには有効
- CPUに比べ、1/30の消費電力でDCTを処理

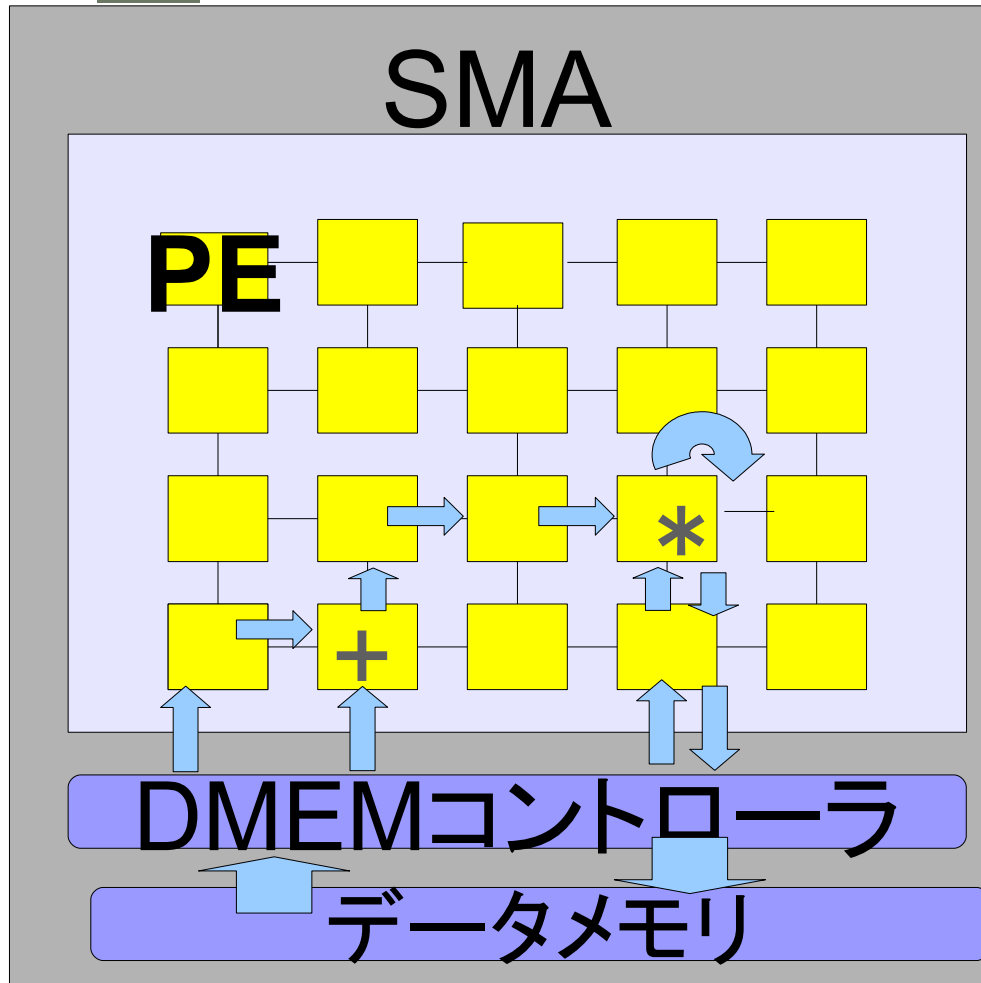
- 多くの入力データを必要とするアプリケーションでは効率良く実行できない



# 研究の目的

- DCT以外のプリケーションにおいて、SMAの性能と汎用性の向上
  - 手法
    1. 様々なアプリケーションをマッピング
    2. アーキテクチャの問題点を調査
    3. 問題解決のためのアーキテクチャを提案・実装
  - 回路面積をあまり増やさずに拡張したい  
(回路面積が大きくなると消費電力が増加)

# Silent Mega Array



## ●構成要素

- PEアレイ
- SMAコントローラ(DMEMコントローラ等)
- データメモリ

## ●特徴

- データパス  
PEアレイの演算内容 + データの流れ
- 命令の制御不要 → 電力削減  
高性能

## ●処理の流れ

1. PEアレイにデータパスを形成
2. メモリからSMAコントローラへデータを転送
3. SMAコントローラからPEアレイへデータを転送
4. PEアレイ内のデータパスに沿って処理



# アーキテクチャの問題点

- DCT以外をSMAにマッピングする際に問題発生



-PE使用率が低い(10%~20%)

- ・変数入力データの供給不足
- ・現在のアーキテクチャは64PEに対して、8変数+16定数を供給してるため

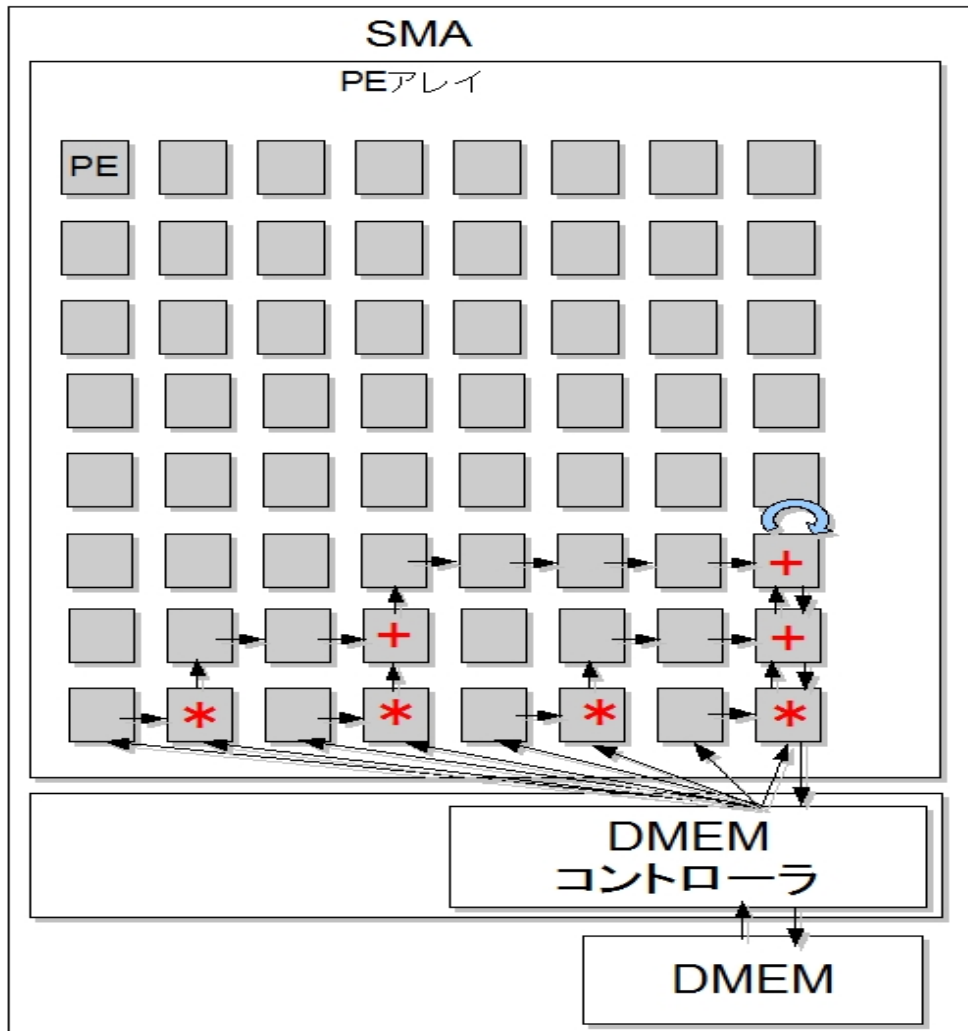
-DMEMコントローラの命令メモリのエントリ数の不足

- ・制御命令プログラムの行数が多い場合、メモリに格納できない

-DMEMコントローラの命令の柔軟性の欠如

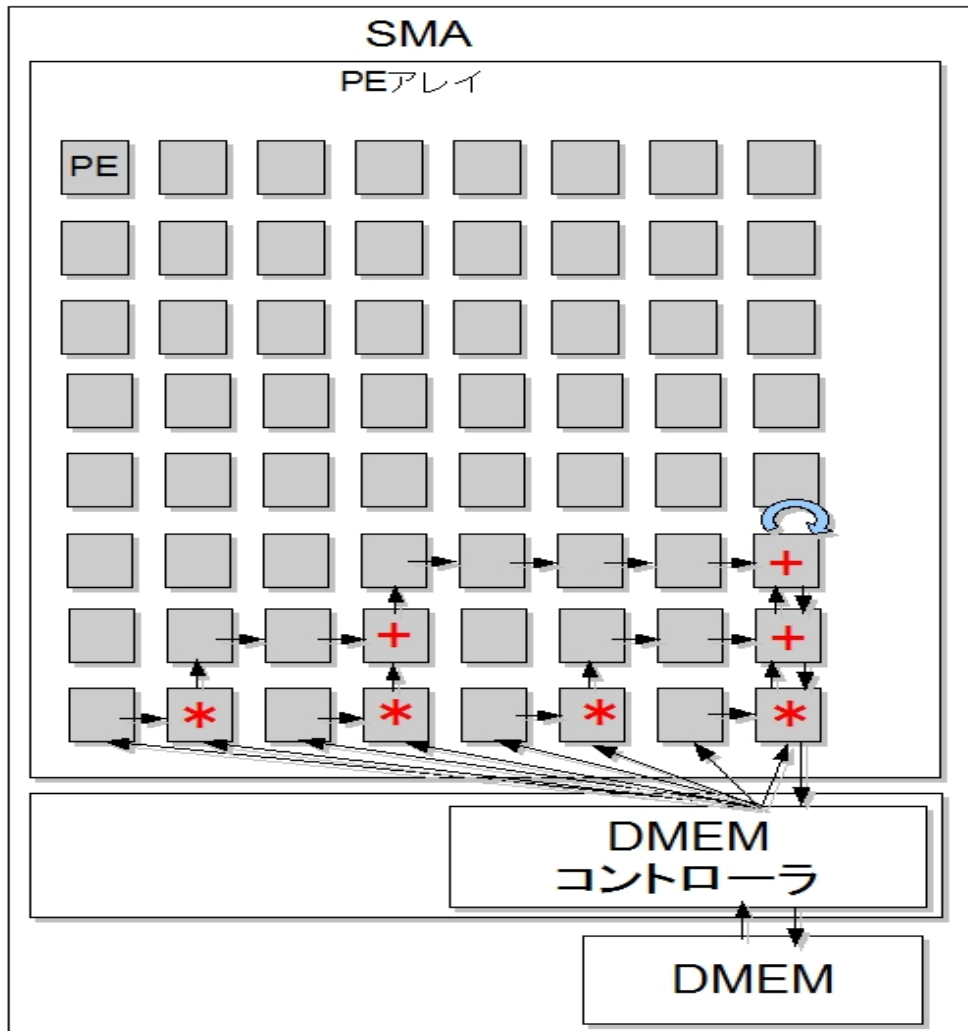
- ・1命令でのDMEM書き込みが連続アドレスにしか書き込めない

# 行列積の例



- 4×4の正方行列の積
  - ・1行1列の計算しかできない
  - PE使用個数が7個
    - 使用率が低い
- ・もっとPEアレイを効率よく使って計算をしたい
- ・PEアレイは1回の計算に必要な電力はほぼ一定
  - リーク電流に起因するため

# PE使用率低下によるサイクル数増加



## ・サイクル

1. DMEMコントローラへデータを転送
2. PEアレイへデータを転送
3. PEアレイ内のデータパスに沿って処理
4. 計算結果をDMEMへ書き込み

## ・サイクル数が増える

- PEアレイの起動回数が増える
- DMEMコントローラの命令実行数が増える
- SMAの実行時間が増える



# PE使用率低下によるサイクル数増加

PEアレイを起動するたびに電力を消費  
起動回数が増えれば消費電力増加

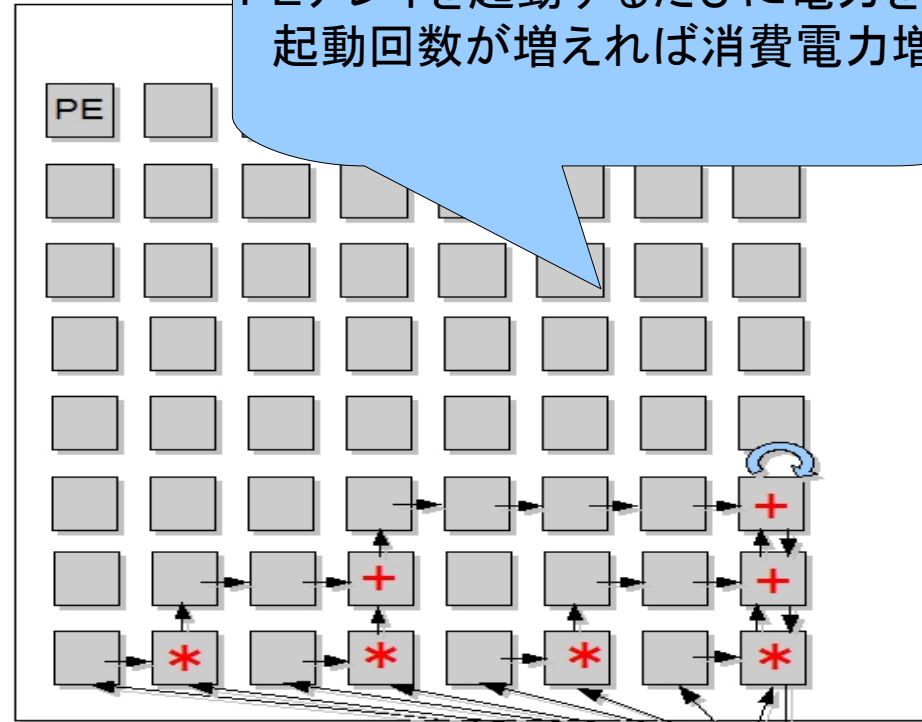
## ・サイクル

1. DMEMコントローラへデータを転送
2. PEアレイへデータを転送
3. PEアレイ内のデータパスに沿って処理
4. 計算結果をDMEMへ書き込み

## ・サイクル数が増える

- PEアレイの起動回数が増える
- DMEMコントローラの命令実行数が増える
- SMAの実行時間が増える

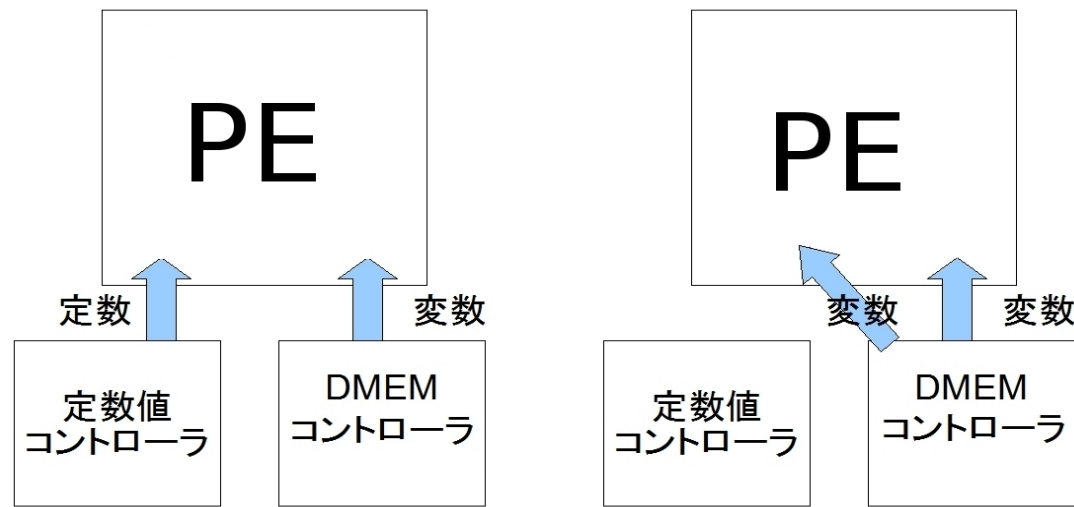
実行命令数が増える  
DMEMコントローラの  
実行時間延長



DMEM  
コントローラ  
DMEM

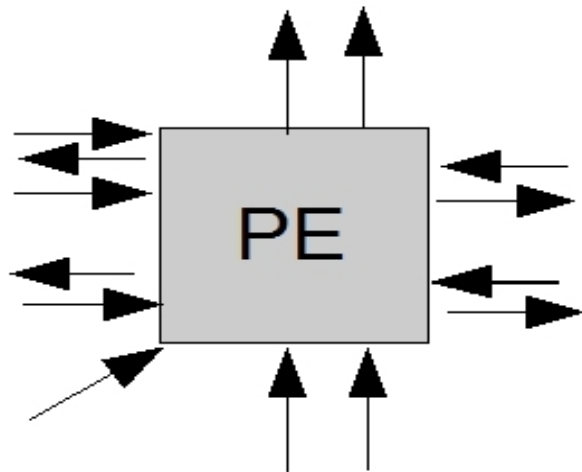
# PE使用率向上のための拡張

- 入力として使える変数を増加
  - 従来は1個のPEへ定数値と変数値を1つずつ供給
  - 16個の定数値を供給していたポートへ変数も供給できるように変更→入力で使える変数を16個増加
  - DMEMコントローラにレジスタと命令追加
  - ポート変更は少ない面積増加、レジスタ追加が面積増加大

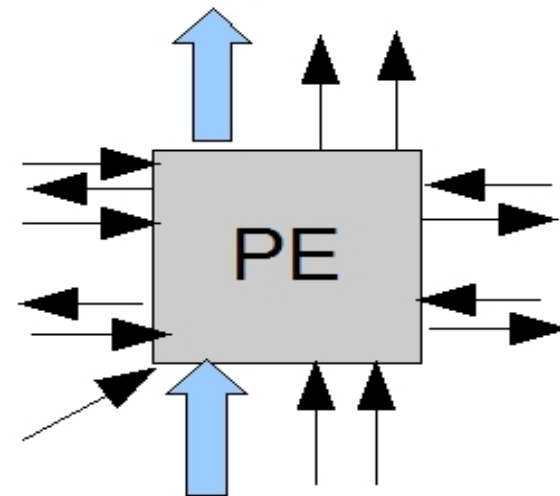


# PE使用率向上のため変数値配線の追加

- PE同士を繋ぐ配線の追加
  - PE使用率は向上したが、PE使用個数が多いとマッピングができない問題が発生
  - 上下の配線を追加
    - 配線は必要最低限の2本追加



従来のPE



拡張後のPE



# 評価

- シミュレーション
  - Cadence社のVC-Verilog3.2
- 論理合成
  - Fujitsu 65nmプロセス、
  - Synopsys社のDesign Compiler 2007.12-SP3
- アプリケーションのプログラム作成ツール
  - Black Diamond [2]  
構成情報を作成するためのコンパイラ
  - shapa  
DMEMコントローラの制御プログラムを作成するためのアセンブラ

[2] TunbunhengVasutan , 他 : 動的リコンフィギャラブルプロセッサアレイの配置配線のための構成情報付きグラフによるアーキテクチャ表現の提案, IEICE Technical Report RECONF 2007-30 (2007-9)



# 行列積の結果

- 変数入力ポートの増強
  - PEの使用率が向上
  - サイクル数削減

| 行列のサイズ                     | 2×2    | 4×4    | 8×8     | 12×12    |
|----------------------------|--------|--------|---------|----------|
| 8変数のPE使用個数<br>(サイクル数)      | 12 (1) | 7 (16) | -       | -        |
| 16変数に改良後のPE使用個数<br>(サイクル数) | 12 (1) | 28 (4) | 15 (64) | -        |
| 24変数に改良後のPE使用個数<br>(サイクル数) | 12 (1) | 56 (2) | 30 (32) | 23 (144) |



# FFTとモザイク処理の結果

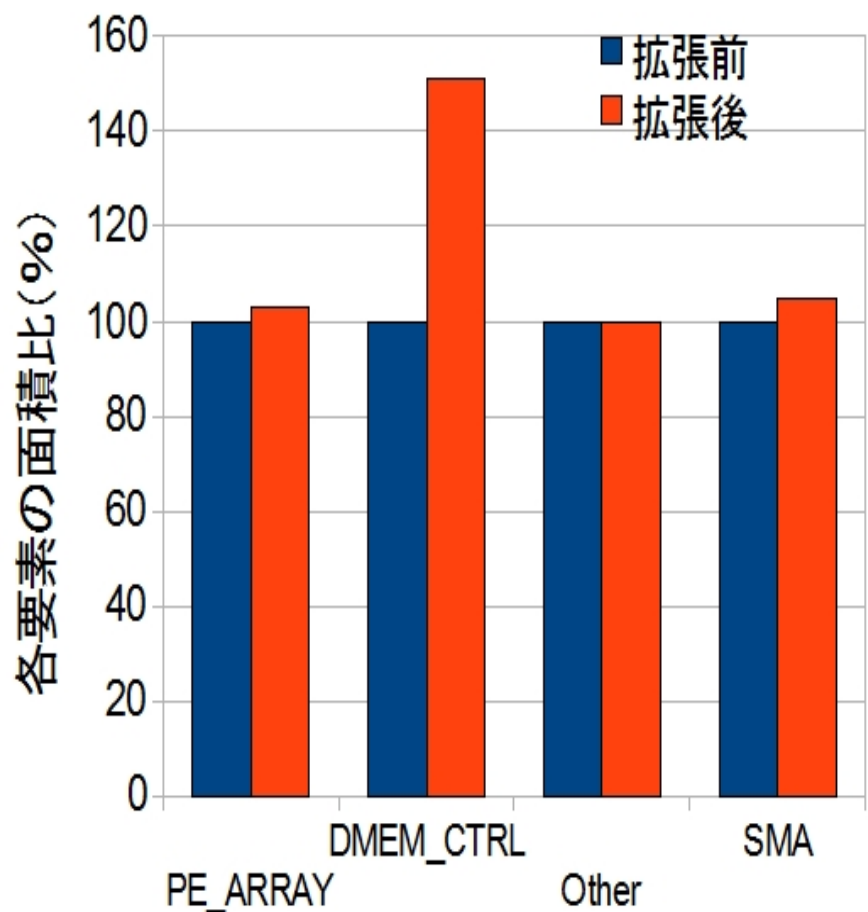
## FFT(高速フーリエ変換)の結果

| 使用変数          | 8       | 16     | 24     |
|---------------|---------|--------|--------|
| PE使用回数(サイクル数) | 10 (12) | 20 (6) | 20 (6) |

## モザイク処理の結果

| 使用変数          | 8     | 16     | 24     |
|---------------|-------|--------|--------|
| PE使用回数(サイクル数) | 8 (9) | 16 (5) | 26 (4) |

# 回路面積



## ・アーキテクチャ拡張による回路面積

### -PEアレイ (PE\_ARRAY)

3%の面積増加、変数ポートの増強とPEの配線増加

### -DMEMコントローラ (DMEM\_CTRL)

50%の面積増加、IMEMエントリ数拡張、特殊レジスタ拡張

### -SMA (PE\_ARRAY, DMEM\_CTRL, Otherを含む)

5%の面積増加、本研究でのアーキテクチャ拡張による面積増加は許容できる範囲内

# 消費電力削減の可能性

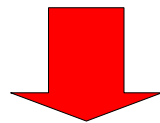
## ・消費電力の減少要因

PEアレイのサイクル数を  
約1/8に減少(行列積)  
約1/2に減少(FFT)  
DMEMコントローラの実行  
時間を短縮  
↓  
SMAの性能向上

## ・消費電力の増加要因

PEアレイは3%面積増加  
DMEMコントローラは50%面  
積増加  
↓  
全体で5%の面積増加  
↓  
SMAの消費電力増加

SMAの消費電力は約65%はPEアレイ



消費電力削減の可能性





# まとめ

- SMAをDCT以外のアプリケーションをマッピングし、問題を調査
- 問題解決するためのアーキテクチャ拡張を提案し実装  
(消費電力の増加を考慮しつつ拡張)
- 実行不可能だったアプリケーションを実行可能  
→ 汎用性の向上
- PEアレイの使用率を最大86%まで向上  
→ サイクル数削減により性能向上
- 本拡張による消費電力削減の可能性