

# 博士論文要旨

## 論文題名：ユーザサポート・ハザード対策を目的とした 組込み機器向けプロセッサの研究

立命館大学大学院理工学研究科  
電子システム専攻博士課程後期課程  
カゲヤマ キョウスケ  
蔭山 享佑

近年、ユーザがモバイルデバイスを利用する場面が多岐に渡ってきており、内部に組み込まれているプロセッサが処理すべきデータ、及び命令に対する要求性能は年々増加している。このため、プロセッサ単体で様々な処理を実行する、“デジタルコンバージェンス”という考えが一般的になっており、プロセッサ内に複数の専用回路を組み込むことによって高性能化を実現している。しかしながら、今後は、より小型のモバイルデバイスが求められており、汎用性を持った単一のアクセラレータをプロセッサに組み込むことで、回路規模を低減しつつ高性能を実現する必要がある。その一方、モバイルデバイスの高性能化で、一般のユーザでも容易に動画像の撮影、編集、及びインターネットへの投稿が可能となった反面、モバイルデバイスを利用する事による社会課題や犯罪が急増していることから、その対策が必要となってきた。

本論文では、汎用性のあるモバイルデバイス向けのアクセラレータであり、CPUでは処理が困難な膨大なデータ量を並列に処理可能な連想メモリベース超並列SIMD型演算コア(Content Addressable Memory-based massive parallel matrix core: CAMX)を提案し、その処理性能を検証する。CAMXはメモリサイズを自由に調整可能な連想メモリで構成されており、左右の連想メモリ間に小型の演算器を挟み込んだ構造を採っている。更に、演算器は小型かつ単純な構成とするため、主に論理回路と加算器のみで構成している。CAMXはビットシリアル・ワードパラレルの処理方法を採用しており、演算はパイプライン処理を実現することで、高並列な処理を実現可能としている。CAMXは連想メモリに格納しているデータに対して検索処理が容易かつ並列に実行できるため、検索データと一致した内部のデータのみを書き換えることを高速に実行可能である。すなわち、CAMXはマルチメディア処理において必要な繰り返し演算処理の並列処理だけでなく、一般的に並列処理が困難であるテーブルルックアップ処理を膨大なデータに対して、並列かつ高速に実行することが可能である。

本研究では第1に、CAMXの有効性を検証するため、基本演算命令(AND、OR、XOR、加算)及び検索命令についてシミュレーションを行った。それぞれ128ビットデータに対して実行した結果、1,024エントリの全データが正確かつ同時に演算が行われ、基本演算命令は約130クロックサイクル、検索命令は1クロックサイクルで実行可能であることを確認した。次に、マルチメディア処理等において求められる符号付乗算処理についても検証を行った。CAMXの演算

器は小型かつ簡単であることを目指しているため、乗算処理の専用回路を組込んでいない。このため、乗算処理を実行するには、論理演算と加算を組合わせて行う必要がある。本論文では、CAMX における最適な乗算処理手法を検証するため、ビットシリアル乗算、検索加算乗算、及び Baugh-Wooley 演算について検証を行った。ビットシリアル乗算、及び加算乗算による乗算処理により 4 ビット符号付乗算を 1,024 エントリに対して実行したところ、ビットシリアル乗算は 1,462 クロックサイクルを要したが、検索加算乗算は 237 クロックサイクルであり、クロックサイクル数を約 84 %削減できることが確認できた。次に、検索加算乗算による乗算処理と Baugh-Wooley 演算による乗算処理を、4~32 ビット符号付乗算で 1,024 エントリに対して実行したところ、15 ビット以上の符号付き乗算では Baugh-Wooley 演算による乗算処理を実行した方が高速に処理可能であった。次に、暗号化手法の一つである AES を実装し、CAMX の基になった MX-1 及び既存のモバイルデバイス向けプロセッサとの性能比較を行った。CAMX と MX-1 の 1 ラウンド当たりのクロックサイクル数について比較した結果、ShiftRows と MixColumns の合計については CAMX が MX-1 よりも約 65%、AddRoundKey については約 86 %も削減できる事が確認できた。既存のモバイルデバイス向けプロセッサの性能比較では、CAMX の方が約 53%も処理時間が少ない事が確認できた。次に、浮動小数点による加算処理も実装、検証した。2 の補数削減処理による単精度浮動小数点加算処理にすることで高性能に実現可能であることを確認し、ARM コアと 1.5 GHz の動作周波数を想定した CAMX を比較したところ、処理データ数が 4,500 を超えると CAMX の方が高性能であることを確認した。

第 2 に、CAMX を組込むことを想定し、モバイルデバイスを用いた近年の社会課題、及び犯罪に対するシステムについて検証した。まず、画像改ざん検知手法であるモルフォロジカルパターンスペクトラム処理を提案し、SRAM ベースの超並列プロセッサである MX-1 に実装、検証した。MX-1 では、HEW シミュレータ、及び評価ボードにて処理可能であることを確認し、HEW シミュレータにおいてはユーザマイクロコードを生成することにより約 5 倍の処理速度向上が可能であることを確認した。さらに、MX-1 と既存のプロセッサにおいて処理性能を比較したところ、MX-1 は高速に実行可能であることを確認できた。また、盗撮防止システムについても構築、及び検証を行った。本システムは LED 照明とスマートフォンの連携によりスマートフォンを操作する手法である。LED 照明とスマートフォンの連携のための最適な信号である  $1/f$  ゆらぎに正弦波を組み込んだトリガを提案し、この信号に対して周波数分解を行うことでトリガである正弦波を抽出する手法について検証した。この結果スマートフォンにおいて信号を検出し、スマートフォンのイメージセンサを停止させる等の操作が可能であることを確認した。

第 3 に、モバイルデバイスの更なる進展を見据え、ウェアラブルデバイスに CAMX を組み込むことを想定した検証も実施した。動物の生態を解明するために、動物にモバイルデバイスを直接取り付けて行動を調査するバイオリギング用データロガーについて、ノーマリオフ技術による低消費電力化を検証した。この結果、行動に合わせたノーマリオフ動作によるデータロガーを用いることで、一般的に販売されている製品を用いて対象動物の約 1 日間の生態を検証することが可能となった。

## **Abstract of Doctoral Dissertation**

### **Title: A Study on Content Addressable Memory-based Massive-parallel SIMD Matrix Core for User Support and Hazard Prevention**

Doctoral Program in Advanced Electrical, Electronic and Computer Systems  
Graduate School of Science and Engineering  
Ritsumeikan University

カゲヤマ キョウスケ  
KAGEYAMA Kyosuke

Recently, semiconductor has been growing and mobile devices are required high performance. Therefore, “Digital convergence” is known in the world. In addition, mobile devices are being used for crime and user support due to the rapid performance improvements.

This paper proposed content addressable memory-based massive-parallel SIMD matrix core (CAMX), which work for versatile accelerator of mobile processor.

CAMX is verified basic operations, search operation, multiplication, AES processing, and floating-point addition. CAMX multiplication becomes most high performance below 15-bit by using search-addition iterative operation. In addition, CAMX is confirmed to have the same MX-1 performance, which is base device for CAMX, by using AES processing.

In addition, digital image forensics and spy-photo used mobile device is prevented by our proposed techniques, and these techniques can realize by CAMX. Digital image forensics detection technique uses morphological pattern spectrum and MX-1 is implemented this processing, which has huge calculation of image processing. In HEW simulator, user micro code of MX-1 can execute about 5 times the processing speed. CAMX is same performance of MX-1, so CAMX can process high performance. Spy-camera prevention system is connected LED lighting and smartphone by visible light beacon. Therefore, this system needs real-time image processing.

In the future, mobile device becomes smaller and more wearable, and bio-logging data logger is more increasing. Therefore, CAMX needs to implement in smaller devices. This paper is shown low power consumption bio-logging data logger. Japanese turtle action and this logger cooperation is verified to become more low power consumption.