

博士学位論文要約 (令和 2 年 9 月)

IoT システムのための FPGA アクセラレータの研究

岡田 光弘

指導教員, 学位論文指導教員: 張山 昌論

FPGA Accelerators for Internet of Things

Mitsuhiro OKADA

Supervisor, Research Advisor: Masanori HARIYAMA

The internet of things (IoT) era in which various things are connected to the Internet is coming. Along with that, it has become easy to collect a large amount of data. However, the lack of CPU performance and the power consumption of data centers are becoming problems to process this large amount of data. In this paper, we propose three types of field-programmable gate array (FPGA) accelerators (near storage type, CPU cooperation type, and single FPGA type) as means for executing applications in the IoT system at high speed and low power consumption. We also established the design policy for speeding up, implemented an application suitable for evaluation to the FPGA, and confirmed its effectiveness.

1. はじめに

インターネットや各種センサデバイスの進化を背景に、パソコンやスマートフォンなど従来のインターネット接続端末に加え、家電や自動車、ビルや工場の機器など、世界中の様々なモノがインターネットへつながる Internet of Things (IoT) の時代が到来している。

IoT システムでは、センサデバイスから出力されたセンサデータはインターネットを介してサーバに送信される。サーバでは、アプリケーションを実行して、実行結果をフィードバックする。このサーバでは、用途に応じて2つのアプリケーションが実行される。1つ目は、分析処理、予測処理、最適化処理などの蓄積されたデータから知見を抽出するバッチアプリケーションである。例えば、地域毎の売り上げを分析する場合、ストレージに蓄積された大量の購買データに対してバッチ処理を実行して、その分析結果をダッシュボードに表示する。2つ目は、異常検知、映像監視、音声翻訳などのサーバに入力されたデータを即時処理するリアルタイムアプリケーションである。例えば、工場機器の異常検知をする場合、サーバに入力されたセンサデータはリアルタイムで処理され、異常と判断した時にアラートが発行される。

近年、このような IoT システムを簡単に構築するための IoT プラットフォームが登場してきており、この IoT プラットフォームを使うことで、大量の IoT データを集めることができるようになっていく。

一方、サーバの演算リソースに目を向けると、メインの演算デバイスである CPU の性能向上は 2010 年頃から横ばいであり、年々増加している IoT データの処理時間の増加が課題となってきた。さらに、大量の IoT データを処理するためには、大規模なデータセンタが必要であるが、その消費電力は 2030 年に全世界の消費電力の 10% に達すると予測されており、データセンタの消費電力が世界的な問題となってきた。

このような背景から、電力効率の高い演算デバイスとして Graphics Processing Unit (GPU) と Field Programmable Gate Array (FPGA) が注目を集めている。GPU は、数千の演算コアを持ったデバイスであり、同じ命令で一度に数千の演算が可能のため、CPU や FPGA に比べて非常に高いピーク性能を発揮する。しかし、消費電力が大きいため、FPGA に比べて電力効率は劣る。一方、FPGA は、書き換えが可能なハードウェアであり、アプリケーションに応じて専用の演算器を生成することが可能であるため、GPU に比べて電力効率が優れている。

本研究では、電力効率の優れている FPGA に着目し、IoT システムのための FPGA アクセラレータを検討した。

2. IoT システム向け FPGA アクセラレータのアーキテクチャに関する基礎的考察

バッチアプリケーションとリアルタイムアプリケーションの処理の特性と処理フローを整理し、処理の特性と処理フローに基づいて 5 つの FPGA アクセラレータを提案した。さらに、提案

した FPGA アクセラレータを 3 つのタイプ (ニアストレージ型, CPU 協調型, FPGA 単体型) に分類し, それぞれについて高速化のための設計方針を策定した (図 1)。

分類	アーキテクチャの概念図	設計方針
ニアストレージ型	FPGAが入力データをリードする 	ストレージのリード性能を最大限引き出す
CPU協調型	CPUが入力データを転送する 	CPU-FPGA間のデータ転送時間を削減する
FPGA単体型	入力されたデータを処理する 	データを蓄えることなく処理する

図 1 FPGA アクセラレータの分類と設計方針

3. ニアストレージ型 FPGA アクセラレータの評価¹⁾

ニアストレージ型 FPGA アクセラレータとして, 画像フィルタリング処理を高速化する例を述べた。まず, 提案するシステム構成と, FPGA と Solid State Drive (SSD)間の通信方式, 全体の処理フローを述べた。次に, リード性能を最大限に引き出すための専用インタフェースと多重コマンド対応及び FPGA の内部実装について述べた。最後に, 画像のフィルタリング処理に関して性能評価を行った。評価の結果, FPGA で実行する提案方式は CPU 処理に比べて, 処理速度が最大 14 倍向上し, 電力効率が約 50 倍優れていることを示した。また, 提案方式は, SSD からデータをリードする処理と同等性能を達成できることを示した。これは, SSD のデータをリードする際にリード性能を劣化させずに FPGA で処理済みのデータをリードできることを意味し, 非常に有効であると考ええる。

4. CPU 協調型 FPGA アクセラレータの評価²⁾

CPU 協調型 FPGA アクセラレータとして, 検索可能暗号を用いたデータベースシステムを高速化する例を述べた。まず, 検索可能暗号を用いたデータベースシステムについて概説した。次に, システム構成とデータベースサーバから FPGA ボードへのデータ転送を削減するための暗号キャッシュ機能を提案した。次に, 対応する検索機能について説明し, FPGA の実装について述べた。最後に, 基本的な 5 つのクエリ(一致検索, 大小比較, 前方一致検索, 部分一致検索, 表結合)に関して性能評価を行った。その結果, FPGA 処理は CPU 処理と比べて, 処理速度が 26 倍から 110.7 倍に向上し, 電力効率が 5.9 倍から 28.3 倍優れていることを示した。また, 提案した FPGA アクセラレータは, 基本的な 5 つのクエリと TPC-H ベンチマークの両方の評価で, 平文の検索処理と同等の処理性能を実現した。これは, クラウド

に暗号化したデータを保存しつつ, 平文の検索処理と同等の処理性能を実現できることを意味し, 非常に有効であると考ええる。

5. FPGA 単体型 FPGA アクセラレータの評価³⁾

FPGA 単体型 FPGA アクセラレータとして, 視覚特性を考慮したフィルタリング処理を搭載した低遅延映像圧縮伝送システムの例を述べた。まず, 低遅延映像伝送システムの構成と, データ削減処理に関しての概説を述べた。次に, FPGA でデータを蓄えることなく, リアルタイムで処理するためのパイプライン処理と回路の並列化について述べた。最後に, 提案した FPGA アクセラレータの性能評価とユーザテストによる主観画質評価を行った。性能評価の結果, 提案した FPGA アクセラレータは CPU 処理と比較して, 処理速度が 7.3 倍向上し, 電力効率が 38.9 倍優れていることを示した。さらにユーザテストの結果, 画質劣化が見られるが気にならないレベルの画質を維持しつつ, 従来に比べ 9.2%~44.7%の伝送ビットレートを削減することができた。

6. まとめ

本論文では, IoT システムのアプリケーションを高速かつ低消費電力で実行する手段として, ニアストレージ型, CPU 協調型, FPGA 単体型の 3 つタイプの FPGA アクセラレータを提案し, それぞれについて高速化のための設計方針を策定した。また, それぞれ評価に適切なアプリケーションを選択し, 設計方針に従い実装して, 有効性を示した。

文献

- 岡田光弘, 野村鎮平, 鈴木彬史, 藤本和久, “ニアデータ処理向け FPGA アクセラレータ”, 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム, Vol. 6, No.1 (2016).
- Mitsuhiro Okada, Takayuki Suzuki, Naoya Nishio, Hasitha Muthumala Waidyasooriya and Masanori Hariyamaand, “FPGA-accelerated Searchable Encrypted Database Management Systems for Cloud Services”, IEEE Transactions on Cloud Computing, DOI : 10.1109/TCC.2020.2969655 (2020).
- 岡田光弘, 佐藤拓柱, 稲田圭介, 谷田部祐介, 伊藤浩朗, 小味弘典, “視覚特性に基づく高効率映像圧縮伝送システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.59, No.7 (2018).