

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00072

研究課題名(和文) ロボット連携クラウド・コンピューティング環境におけるFPGAコンポーネント技術

研究課題名(英文) FPGA component technology in cloud computing environment cooperating with robots

研究代表者

大川 猛 (Ohkawa, Takeshi)

東海大学・情報通信学部・准教授

研究者番号：80392596

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：FPGA上の回路をエッジ・クラウド計算機環境において、ソフトウェア同様に再利用可能なコンポーネントとして扱うための技術として、以下3点の実現によりクラウドにおけるFPGAコンポーネントを用いた設計技術を実現するための研究を行った。(1) アプリケーションに応じて最適化したHW/SW間通信方式 (2) 再利用可能なHWコンポーネント方式 (3) コンポーネントの物理マッピングによるFPGAコンパイル時間の短縮

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、クラウド計算機環境においてFPGAを利用したリコンフィギュラブルシステムの設計生産性の向上を狙うものである。FPGAをコンポーネントとして扱う設計手法を提案し、実際にロボットとクラウドを連携するシステムを構築して実証する点で学術的特色がある。部品の静的・動的リンクによってソフトウェア同様の設計環境を構築することが可能となる点、およびコンポーネントの物理マッピングによって、FPGAコンパイル時間の短縮を行う点で独創的で本研究により、有益な知的機能が次々とハードウェア部品化され流通するための基盤として貢献する。

研究成果の概要(英文)：In the cloud computing environment, I have conducted research to realize a design technology using FPGA components in the cloud by implementing the following three points, as a technology for handling circuits on FPGA as reusable components like software. (1) HW/SW communication method optimized according to the application (2) Reusable HW component method (3) Reduction of FPGA compilation time by physical mapping of components

研究分野：ソフトウェア・ハードウェア協調設計

キーワード：FPGA コンポーネント技術 ロボット HW/SW協調設計 クラウド

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ロボットのための知的処理システムは、これまで個別の発展を遂げてきた制御技術・認識技術等を統合し高度化する段階にある。今後はロボット単体での知的処理だけではなく、クラウド計算機環境とのネットワーク接続による計算資源の活用と、データセンターのビッグデータの活用によって、人間の能力を超える認識・判断とロボット制御の統合が可能になっていくと期待される。一方、FPGA(Field Programmable Gate Array)は、アプリケーションに特化した最適なハードウェアによる並列処理を行うことで、要求の処理を高い電力効率（数 MOPS/mW＝マイクロプロセッサの 10 倍程度）で実現可能である。FPGA を導入することでロボットシステムの情報処理に係るエネルギー効率を大幅に向上することが期待される。しかし、FPGA の設計は一般にソフトウェアと比較してコンパイル（論理合成・配置配線）に時間がかかる、などに起因して設計生産性が低い。そのため、一般的なソフトウェア技術者が FPGA のメリットを享受できる設計開発のための基盤が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、クラウド計算機環境において再利用可能な FPGA コンポーネント設計技術の実現を目的とする。そのため、ロボットとの連携を想定したクラウド計算機環境で、FPGA のハードウェア(HW)処理をソフトウェア(SW)から扱う際の基盤となる設計技術の研究を行い、ロボットとクラウドが連携するシステムの設計生産性を向上する。具体的には、クラウド計算機環境において FPGA 上の回路をソフトウェア同様に再利用可能なコンポーネントとして扱うための技術を研究する。そのために、以下 3 点の実現によりクラウドにおける FPGA コンポーネントを用いた設計技術を確立する。

- (1) アプリケーションに応じて最適化した HW/SW 間通信方式
- (2) 再利用可能な HW コンポーネント方式
- (3) コンポーネントの物理マッピングによる FPGA コンパイル時間の短縮

3. 研究の方法

以下の研究項目に関する研究を行った。

項目 1. クラウドにおける FPGA コンポーネントの要求分析と基本設計

クラウド計算機環境において、FPGA コンポーネントが備えるべき機能・性能がどのようなものか要求分析を行い基本設計する。

項目 2. HW/SW 間のメッセージ形式・転送プロトコルの設計

過去に研究代表者が提案した ROS(Robot Operating System)準拠 FPGA コンポーネントの考え方(図 1)をもとにして、Publish/Subscribe 型の通信を行う FPGA コンポーネントの通信方式と実装方法の検討を行う。FPGA コンポーネントにおいて、性能オーバーヘッドを決めるのが HW/SW 間の通信方式である。バグが入り込みやすい HW/SW 間のトランザクション・通信を開発者から隠蔽して設計生産性を向上し、かつ HW/SW 間の通信遅延を最小化する為に、アプリケーション層で規定されたメッセージ形式に基づいて、HW/SW 間のメッセージ形式・転送プロトコルを最適化する。

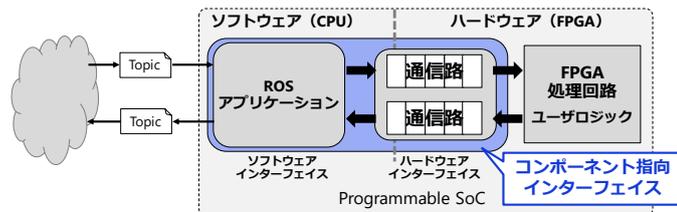


図 1 ROS 準拠 FPGA コンポーネントの構成

項目 3. 動的・静的リンク可能な HW コンポーネント形式の設計

ソフトウェア開発と同様のライブラリリンク機構を、FPGA の開発においても実現するための、HW/SW コンポーネント形式を設計する。

項目 4. FPGA 向け再利用可能コンポーネント設計環境の構築

項目 2 および項目 3 の設計を基にして、FPGA 向けの再利用可能コンポーネント設計環境を構築する。また、FPGA 設計環境と連携し、コンポーネントの物理マッピングにより設計 TAT を短縮するための手法検討を行う。

項目 5. 設計環境の評価(性能評価および被験者実験による主観評価)

項目 4 で構築した設計環境について、性能評価および被験者実験による主観評価を行う。

項目 6. ロボット・クラウド連携による実証システムの開発・評価

項目 4 の設計環境を用いて、ロボットとクラウド計算機環境を連携した実証システムを開発し提案手法の有効性を評価する。

4. 研究成果

◆項目1. クラウドにおける FPGA コンポーネントの要求分析と基本設計

工場等で使用される移動型ロボットを対象として調査し、環境地図作成(SLAM)等についての機能・性能要件についての明文化・定量化を進めた。SLAM の処理を、エッジおよびクラウドに分散して配置した場合の性能分析と基本設計を行い、学会発表[1][2]を行った。

◆項目2. HW/SW 間のメッセージ形式・転送プロトコルの設計

HW/SW で Publish/Subscribe 型の通信を行う FPGA コンポーネントの方式検討を引き続き進めた[3]。HW と SW の間でのメッセージ形式として、ROS 通信プロトコルに準拠した通信を行うため、FPGA 内部において、ROS 通信プロトコルのメッセージの解釈と処理対象データの抽出をハードウェアにより行う回路を HLS によって実装する方法を検討し、FAST 局所特徴点を画像が検出処理を行い電力・性能を評価した。結果として、HDL で実装した場合と同等の電力性能比を得ることを確認し国際会議にて発表した[4]。更に、同様の考え方のメッセージ通信を、3次元 LSI チップ積層システムへ応用することを想定した、メッセージ形式・転送プロトコルの設計を行い国際会議発表した[8]。

◆項目3. 動的・静的リンク可能な HW コンポーネント形式の設計

FPGA 上のコンポーネント間通信の動的・静的リンク可能スイッチモジュールの開発を行った。これは動的リンク・静的リンクのいずれにも対応可能な方式となっているが、柔軟性のために回路規模（特にバッファ用 BRAM 容量）は大きくなる傾向がある。このコンポーネント間通信のスイッチモジュールをもとにしたコンポーネント指向 FPGA 設計に関して、国内シンポジウムおよび国際会議での発表[5][6]を行った（発表学生が IPSJ の CS 領域奨励賞を受賞）。

◆項目4. FPGA 向け再利用可能コンポーネント設計環境の構築

ROS2/DDS の実装である FastRTPS をベースとした C/C++言語による機能シミュレーション環境を構築した。このシミュレーションによりコンポーネント指向の FPGA 開発が支援可能となり研究会発表を行った[7]。しかしハードマクロレベルでのコンポーネント間接続・通信については依然検討段階である。そのため、項目5の設計環境の評価については今後の課題である。

◆項目6. ロボット・クラウド連携による実証システムの開発・評価

ロボット・クラウド連携による実証システムの開発については、ROS による通信を活用しエッジでの画像入力処理とクラウドでの画像認識処理の連携を行う小規模実証システムを開発した[4]。また、国際会議における FPGA 画像認識による自動運転コンテストに出場し、複数 FPGA をコンポーネントとみなして、コンポーネント指向による FPGA システムを設計する実例を示した[7]。

以上の研究により、アプリケーションに応じて最適化した HW/SW 間通信方式、再利用可能な HW コンポーネント方式に関して、上記の研究成果を上げることが出来た。一方、項目4の構築が研究期間内に完了しなかったため、項目5の設計環境の評価（性能評価および被験者実験による主観評価）については今後の課題となった。また、研究目的として掲げた「(3)コンポーネントの物理マッピングによる FPGA コンパイル時間の短縮」については未着手であるため、本研究において提案した HW コンポーネント技術をもとにして、引き続き実現に取り組みたい。

参考文献

- [1] 後村 胤樹, 大川 猛, 大津 金光, 横田 隆史, 馬場 敬信, “Visual SLAM ソフトウェア高速化検討のための処理時間分析,” 情報処理学会第 80 回全国大会 講演論文集, pp.1-125~1-126, 2018.
- [2] 征矢 あおい, 大川 猛, 大津 金光, 横田 隆史, “通信ミドルウェアを用いたロボット・クラウド連携分散 SLAM 処理の通信性能,” 情報処理学会第 80 回全国大会 講演論文集, pp.1-107~1-108, 2018.
- [3] OHKAWA Takeshi, YAMASHINA Kazushi, MATSUMOTO Takuya, OOTSU Kanemitsu, YOKOTA Takashi, “Automatic Generation Tool of FPGA Components for Robots,” IEICE TRANS. INF. & SYST., VOL. E102-D, NO.5 MAY 2019, pp.1012-1019, 2019.
- [4] OHKAWA Takeshi, YAMASHINA Kazushi, MATSUMOTO Takuya, OOTSU Kanemitsu, YOKOTA Takashi, “High Level Synthesis of ROS Protocol Interpretation and Communication Circuit for FPGA,” 2019 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Robotics Software Engineering (RoSE), pp. 33-36, 2019.
- [5] Kenta Arai, Takeshi Ohkawa, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, “Proposal of Publish/Subscribe Communication Framework for Circuit Components on FPGA,” In proc of Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2018 (APRIS2018), pp. 42 - 43, 2018.
- [6] Kenta Arai, Takeshi Ohkawa, OOTSU Kanemitsu, YOKOTA Takashi, “Component-based FPGA development of intelligent image processing for industrial IoT devices,” International Workshop on Embedded Software for Industrial IoT (ESIIT Workshop 2019) c/w DATE19, 2019.
- [7] Ohkawa Takeshi, Tayama Shotaro, Mori Hayato, Lee Dohyung, Amano Hayato, Hirakawa Itsuki, Sato Mikiko, Watanabe Harumi, “Design and Development of Networked Multiple FPGA Components for Autonomous Tiny Robot Car,” In proc. of FPT’ 19, pp.473-475, 2019.
- [8] Ohkawa Takeshi, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi, Kikuchi Katsuya, Aoyagi Masahiro, “Designing Efficient Parallel Processing in 3D Standard-Chip Stacking System with Standard Bus,” In proc. of MCSoc2017, pp. 128-135, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kenta Arai, Takeshi Ohkawa, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota	4. 巻 1
2. 論文標題 Proposal of Publish/Subscribe Communication Framework for Circuit Component on FPGA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform	6. 最初と最後の頁 42 - 43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 新井健太、大川 猛、大津金光、横田隆史	4. 巻 1
2. 論文標題 FPGAを用いた機能回路コンポーネント間のPublish/Subscribe通信フレームワークの提案	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 組込みシステムシンポジウム2018論文集	6. 最初と最後の頁 9 - 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohkawa Takeshi, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi, Kikuchi Katsuya, Aoyagi Masahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Designing Efficient Parallel Processing in 3D Standard-Chip Stacking System with Standard Bus	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 IEEE 11th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc)	6. 最初と最後の頁 pp. 128-135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/MCSoc.2017.27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 OHKAWA Takeshi, YAMASHINA Kazushi, MATSUMOTO Takuya, OOTSU Kanemitsu, YOKOTA Takashi	4. 巻 E102.D
2. 論文標題 Automatic Generation Tool of FPGA Components for Robots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1012-1019
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2018RCP0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ohkawa Takeshi, Sugata Yuhei, Watanabe Harumi, Ogura Nobuhiko, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi	4. 巻 1
2. 論文標題 High Level Synthesis of ROS Protocol Interpretation and Communication Circuit for FPGA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Robotics Software Engineering (RoSE)	6. 最初と最後の頁 33-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/RoSE.2019.00014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ohkawa Takeshi, Tayama Shotaro, Mori Hayato, Lee Dohyung, Amano Hayato, Hirakawa Itsuki, Sato Mikiko, Watanabe Harumi	4. 巻 1
2. 論文標題 Design and Development of Networked Multiple FPGA Components for Autonomous Tiny Robot Car	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)	6. 最初と最後の頁 473-475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICFPT47387.2019.00096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 YOKOTA Takashi, OOTSU Kanemitsu, OHKAWA Takeshi	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Genetic Node-Mapping Methods for Rapid Collective Communications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 111 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018EDP7386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kenta Arai, Takeshi Ohkawa, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota
2. 発表標題 Component-based FPGA development of intelligent image processing for industrial IoT devices
3. 学会等名 International Workshop on Embedded Software for Industrial IoT (ESIIT Workshop 2019) c/w DATE19, March 29, 2019, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 健太, 大川 猛, 大津 金光, 横田 隆史, 菊地 克弥, 青柳 昌宏
2. 発表標題 3次元積層LSIシステムのための簡易的な通信方式エミュレータの構築
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会 講演論文集, pp.1-105 ~ 1-106 (2018.03.15)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 征矢 あおい, 大川 猛, 大津 金光, 横田 隆史
2. 発表標題 通信ミドルウェアを用いたロボット・クラウド連携分散SLAM処理の通信性能
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会 講演論文集, pp.1-107 ~ 1-108 (2018.03.15).
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後村 胤樹, 大川 猛, 大津 金光, 横田 隆史, 馬場 敬信
2. 発表標題 Visual SLAMソフトウェア高速化検討のための処理時間分析
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会 講演論文集, pp.1-125 ~ 1-126 (2018.03.15).
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Ohkawa, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, Katsuya Kikuchi, Masahiro Aoyagi
2. 発表標題 Methodology study of HW/SW Cooperative System Design for 3D Standard Chip Stacking System
3. 学会等名 IEEE 11th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc-17), September 18-20, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 新井 健太、大川 猛、横田 隆史、大津 金光
2. 発表標題 高位合成可能なC++記述のための分散ミドルウェアを用いた機能シミュレーション
3. 学会等名 IPSJ/第51回組込みシステム研究発表会@東海大学 高輪キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新井 健太、大川 猛、横田 隆史、大津 金光
2. 発表標題 コンポーネント指向FPGA開発環境及び開発自動化ツールの提案
3. 学会等名 IEIEI/RECONF研究会@慶応義塾大学 日吉キャンパス 来往舎
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ohkawa Takeshi, Sugata Yuhei, Watanabe Harumi, Ogura Nobuhiko, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi
2. 発表標題 High Level Synthesis of ROS Protocol Interpretation and Communication Circuit for FPGA
3. 学会等名 2019 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Robotics Software Engineering (RoSE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ohkawa Takeshi, Tayama Shotaro, Mori Hayato, Lee Dohyung, Amano Hayato, Hirakawa Itsuki, Sato Mikiko, Watanabe Harumi
2. 発表標題 Design and Development of Networked Multiple FPGA Components for Autonomous Tiny Robot Car
3. 学会等名 2019 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

FPGA-Component Project
<https://fpga-component.github.io/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	田向 権 (Tamukou Hakaru) (90432955)	九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授 (17104)	
連携研究者	成瀬 継太郎 (Naruse Keitaro) (10301938)	会津大学・コンピュータ理工学部・教授 (21602)	
連携研究者	馬場 敬信 (Baba Takanobu) (70092616)	宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・教授 (12201)	
連携研究者	横田 隆史 (Yokota Takashi) (90334078)	宇都宮大学・工学部・教授 (12201)	
連携研究者	大津 金光 (Ootsu Kanemitsu) (00292574)	宇都宮大学・工学部・教授 (12201)	