

1. 氏名	伊藤 智義
2. 所属機関	千葉大学 工学研究院
3. 研究題目	FPGAを活用したエッジコンピューティングIoTの開発による次世代ネットワークシステムの研究

4. 研究の目的:

近年、クラウド型のネットワークシステムが発展している。現実空間から得られた豊富なデータはクラウド上のデータセンタに集約され、強力なコンピュータで処理される。ところが、端末(エッジ)数は増大を続けており、中央集約型のクラウドコンピューティングが機能しなくなる危険性が指摘されている。エッジの代表例としてはスマートフォンや監視カメラがあり、中央集約型のネットワークシステムはプライバシー保護の観点からも脆弱性を抱えている。そこで、FPGA の回路再構成機能を利用して、クラウドネットワークとエッジネットワークを動的に切り替える新たなネットワークシステムを提案し、それを実現するための知的な IoT デバイスの開発を行う。

本研究では、近年、多発している災害に対応したシステムを想定して研究開発を行う。災害対応の一つとして、監視カメラを活用した誘導システムがある。今日、都市部には 100 万台規模の監視カメラが設置されている状況にある。ただし、監視カメラに情報処理機能を持たせることは、通常時における計算資源の無駄につながり、普及していない。そこで、IoT には FPGA チップを組み込み、AI 計算の機能を持たせる。通常時は需要が急増している AI 計算を行う IoT ネットワークを構成する。災害時には FPGA チップが自律的に回路を切り替え、避難誘導システムの機能を発揮する。FPGA は CPU や GPU と異なり、製品のライフサイクルが数年単位と長い。高性能計算には欠点にもなり得るが、保守が容易になるという点で社会インフラとして適している。地球規模で考えれば、使われていない IoT の計算資源は莫大である。高機能で高効率な次世代ネットワークシステムの実現に貢献する。

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

クラウドコンピューティングとエッジコンピューティングを切り替えるネットワーク再構成システムの実現に向けて次の 6 項目の研究開発を行った。

(1) ネットワーク再構成システム

FPGA は回路を自由に書き換えられる IC チップである。そのため、複数の回路を事前に用意しておき、状況に応じて回路を再構成することが可能である。近年では、FPGA チップの中に CPU 機能をあらかじめ組み込んだ SoC(System on a Chip)という IC が安価に入手できるようになってきている。SoC を利用すれば、ホスト計算機がなくてもチップだけで複数の情報処理が可能になる。本研究では SoC を用いて自立的にクラウドネットワークとエッジネットワークを切り替える回路を設計し、IoT デバイスを開発した。

クラウドコンピューティングとして、PC1 台をクラウドサーバーとおき、スタンドアロンタイプの小規模 SoC ボード(ザイリンクス社製 ZCU104)を IoT デバイスと見立てて 4 台のネットワークを構築した。通常時は 4 台の SoC ボードが PC とそれぞれ通信を行い、通常モードの情報処理を行う。PC との通信が 5 秒間途切れた場合を緊急時と判断し、各 SoC が自立的に回路を再構成して 4 台の IoT デバイスのみでネットワークを構成する。

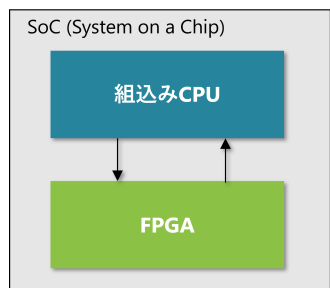


図 1. システム・オン・チップ

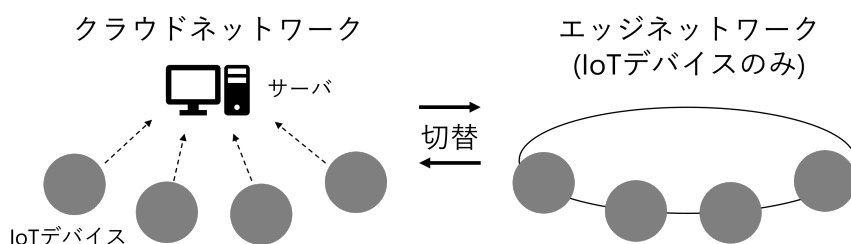


図 2. ネットワーク再構成システム

(2) 避難誘導用 AI 回路

緊急時用の回路を機械学習によって設計した。黒丸を人に見立て、その数をカウントする。カウント数はスマートフォンからアクセスできるようなアプリケーションも同時に開発した。この回路は、SoC で緊急時と判断された場合に通常時から切り替わって使用される。

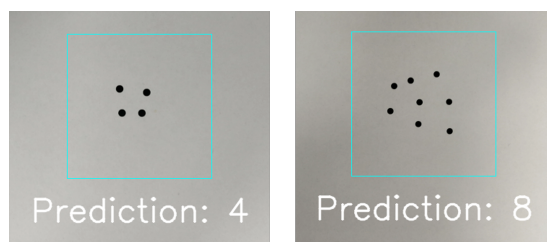


図 3. 人数把握用学習画像

(3) 通常時の AI 計算回路

FPGA は GPU や専用開発された Google TPU (Tensor Processing Unit) と並んで、第 3 の AI チップ候補として注目されている。AI 計算が通常の計算精度 (64bit/32bit) よりも低精度の (16bit/8bit) で十分であることが明らかになったからである。FPGA は回路設計が自由に行える代わりに実装密度を上げることが難しく、高精度の演算には不向きであるが、低精度であれば機能を十分に発揮できる。IoT デバイスが FPGA ベースで開発されるようになれば、膨大な計算資源が創出されることになり、急増を続けている AI 計算に対応可能である。これまでも宇宙人探知で有名な「SETI」プロジェクトで空いているコンピュータを地球規模のネットワークで利用する試みが行われている。もし都市インフラとして配置されている IoT デバイスで同様の大規模分散型の計算が行えるようになれば、個人情報の漏洩リスクも低く、かなりインパクトのある次世代計算ネットワーク資源になり得るものと期待される。

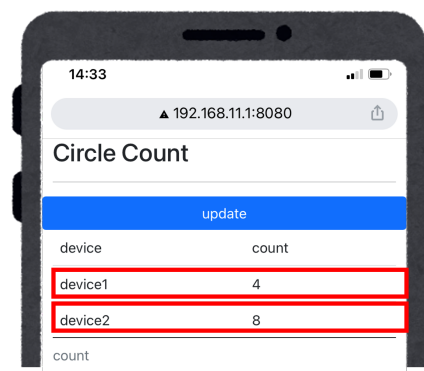


図 4. カウント数のスマホ表示

申請者の研究室では学生 (大学院修士学生まで) を対象とした国際大会である「LSI デザインコンテスト」(電子情報通信学会などが協賛) に出場を続けている。最近では AI 計算がテーマとなっており、回路設計及び FPGA 実装を行っている。助成を受けた 3 年間はいずれも優勝及び準優勝 (準優勝は 4 件選出されるうちの 1 件) を獲得している。本研究とも直結しており、通常時の AI 回路として IoT デバイスに実装する。

(4) プライバシ保護用一画素カメラ

シングルピクセルイメージング (一画素カメラ) は、原理的には 100 年前に知られていた技術であるが、光学素子や計算パワーの向上とともに、近年、再び研究が盛んになってきている。研究の主流は高画質化であるが、本研究では画質が計算に依存することに着目し、プライバシー保護を目的として、計算回路 (ハードウェア) で画質を制御するシングルピクセルイメージングシステムを開発した。

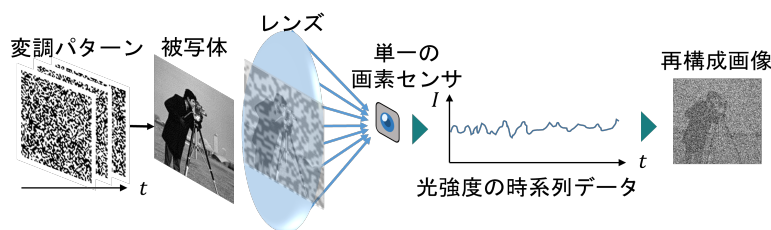


図 5. シングルピクセルイメージング

(5) IoT デバイスを自動識別する認証システム

ネットワークが普及するにつれて「なりすまし」の危険性も増大している。安心安全な IoT ネットワークを構築するためには IoT デバイスを自動識別する技術が不可欠である。通常はソフトウェアレベルで行われているが、被害は増え続けている。根本的な解決策として、同じデバイスでも固有の特性で区別できる方法を模索した。本研究

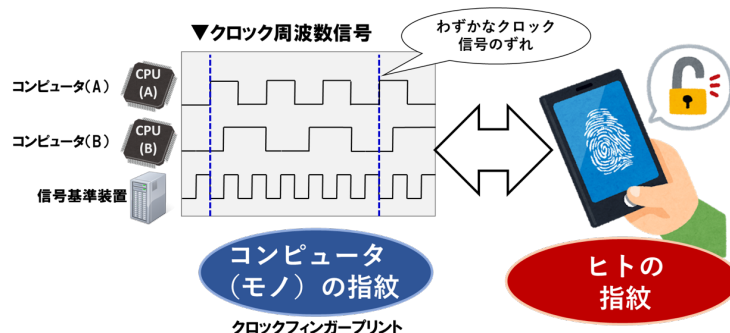


図 6. クロックフィンガープリント

では、デバイスの持つシステムクロックが同じ製品でも差異があることを見出し、クロックフィンガープリント(クロックの指紋)と名付けて研究を行った。複数のコンピュータで環境の変動も加えて検証した結果、有効性を確認した。

(6) 地産地消型ネットワーク

プライバシー保護の観点からは、ローカルで処理すればよい個人情報はクラウドに送らない方が安全である。例えば、子どもや老人などを見守りたい場合、監視カメラをフル稼働させれば目的は達成できるが、対象となっていない人の情報までもクラウドに上がってしまうことは危険である。そこで、ローカルなネットワークで情報を識別する地産地消型のネットワークシステムを検証し、提唱した。

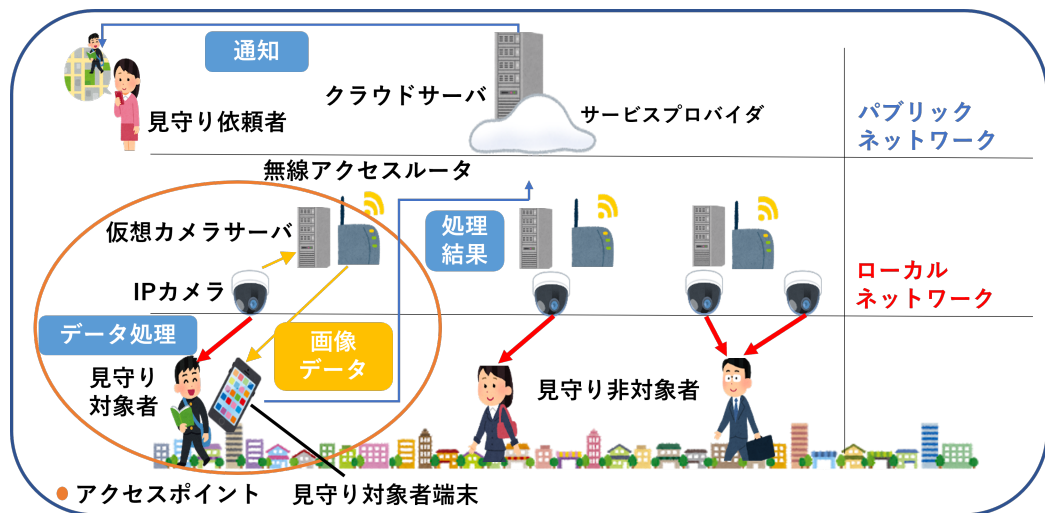


図 7. 地産地消型ネットワークシステム

6. 研究の成果と結論、今後の課題：

これまでの研究成果について研究項目(1)–(6)にそって記載し、今後の課題についてまとめる。

(1) ネットワーク再構成システム

すべての要素技術について、開発に成功したところである。通常時は4台のSoCボードがPCとそれぞれ通信を行い(クラウドネットワーク)、PCとの通信が5秒間途切れた瞬間に4台のIoTのみでエッジネットワークを構成することを確認している。SoCを用いた初期の研究成果として論文[9]を発表した。

(2) 避難誘導用 AI 回路

避難誘導用のAI回路の設計及び実装に成功した。スマートフォンとの情報のやり取りも確認している。

(3) 通常時の AI 計算回路

助成を受けていた3年間の「LSIデザインコンテスト」の課題は次の通りで、すべてAI関連である。いずれの年も申請者の研究室学生が回路実装に成功し、優勝及び準優勝を獲得している。それぞれの具体的なタイトルは「研究成果」の最後に参考としてあげさせて頂いた。ご高覧頂ければ幸いです。そのうちの一つは論文[7]としても発表している。

2020年「Deep Learning (Backpropagation)」 2021年「Reinforcement Learning」

2022年「Deep Q-Network : DQN」

・(1)–(3)を統合した「ネットワーク再構成システム」に関する本研究の集大成に位置する論文を準備中です。コロナ禍における半導体不足によって計画が少しずれ込みました。ご容赦頂けますと幸いです。

(4) プライバシ保護用一画素カメラ

研究進捗は順調で、2編の論文[4][8]が掲載され、国際会議[6]では「Best Poster Award」を受賞[4]するなど、対外的に高い評価を受けた。学内においても、2件の特許[1][2]の出願が認められた。最新の成果は論文投稿中である。

(5) IoT デバイスを自動識別する認証システム

電子情報通信学会通信ソサイエティネットワークソフトウェア研究会で「デジタル機器の時刻ドリフトとマイクロプロセッサのコア温度間の特徴量に基づく個体識別技術」と題した発表が高く評価され、2019年度の「若手研究奨励賞」を受賞[3]した。引き続き、2編の論文[3][5]が掲載され、1件の国際会議発表[5]を行った。

(6) 地産地消型エッジコンピューティングネットワーク

国際会議[6]の発表に続いて、電子情報通信学会通信ソサイエティネットワークソフトウェア研究会で「5G/MECによる個人情報の漏洩を抑制するカメラ型広域見守りシステムの提案」と題した発表を行い、提案内容が高く評価され、2020年度の「ネットワークシステム研究賞」を受賞[2]した。

3年間で11編の論文発表、6件の国際会議発表、2件の特許出願を行い、4件の受賞を頂いた(その他にLSIデザインコンテストの表彰が6件ある)。これらの研究成果は申請者と一緒に活動してくれた共同研究者の方々及び学生たちによるところが多く、感謝している。さらに、投稿中の論文及び投稿準備中の論文で、本研究の意義を多くの方たちに発信していく所存である。

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

IoTデバイスによる地球規模の超分散型計算ネットワークにつながる基礎研究レベルにまで達した手応えを感じており、今後の計算資源を検討する上で重要な方向性を示すものと期待される。例えば、現在の AI 計算はグーグル等が提供する GPU サーバーに託す形で行われるのが一般的である。つまり、クラウドの負荷は増加する一方である。その負荷をエッジ側の(しかも個人と関係しない)都市インフラに担わせることができれば、計算資源は(当面は)無尽蔵と見なすこともできるはずであり、ブレークスルーとなり得るものと考えている。

7.2_社会的価値:

ネットワークを動的に(自立的に)切り替えるシステムはトラフィック量の大幅な低減にもつながり、社会的な価値は高く、産業界に対するインパクトも大きいものと期待される。また、知的な IoT デバイスが普及することで近年増加している自然災害等の対策として機能する。さらに、負荷分散されたネットワークシステムはプライバシー保護も容易にし、安全安心な社会に貢献するものと考えている。

7.3_研究成果:

「研究論文(原著)」

- [0] S. Fujimori, M. Shotoku, I. Hoshi, T. Nishitsuji, N. Hoshikawa, S. Shiraki, A. Shiraki, T. Shimobaba, T. Ito, “Network reconstruction system using FPGA and application to disaster countermeasures” (in preparation)
- [0] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Real-time single-pixel imaging using a system on a chip field-programmable gate array,” Scientific Reports (submitted)
- [1] 干川尚人, 大島達也, 西辻崇, 白木厚司, 伊藤智義, “マシンルーム環境監視のための汎用ベースロボットの提案,” 電子情報通信学会論文誌 B, 早期公開論文 (2022.4)
- [2] T. Imamura, M. Baba, N. Hoshikawa, H. Nakayama, T. Ito, A. Shiraki, “A New Algorithm for Displaying Images With High Resolution Using a Directional Volumetric Display With Threads and a Projector,” IEEE Access 10, 15288–15297 (2022.2)
- [3] 干川尚人, 古井海里, 白木厚司, 伊藤智義, “時刻ドリフトの平均 2 乗誤差分析によるオンライン機器の識別技術,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J104-B, 761–771 (2021.10)
- [4] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Optimized Binary Patterns by Gradient Descent for Ghost Imaging,” IEEE Access 9, 97320–97326 (2021.7)
- [5] N. Hoshikawa, R. Namiki, K. Hirata, A. Shiraki, T. Ito, “Extraction of Computer-Inherent Characteristics Based on Time Drift and CPU Core Temperature,” IEEE Access 8, 207134–207140 (2020.11)
- [6] M. Baba, T. Imamura, N. Hoshikawa, H. Nakayama, T. Ito, A. Shiraki, “Development of a multilingual digital signage system using a directional volumetric display and language identification,” OSA Continuum 3, 3187–3196 (2020.11)
- [7] 星郁雄, 天野洋, 橋本大志, 田中大智, 下馬場朋禄, 角江崇, 伊藤智義, “リカレントニューラルネットワークを用いた学習・推論器の FPGA 実装及び音声識別,” 電子情報通信学会論文誌 D, J103-D, 808–816 (2020.11)
- [8] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Single-pixel imaging using a recurrent neural network combined with convolutional layers,” Optics Express 28, 34069–34078 (2020.10)
- [9] 山本洋太, 増田信之, 中山弘敬, 下馬場朋禄, 角江崇, 伊藤智義, “System on a Chip を用いた小型な電子ホログラフィ専用計算機の開発,” レーザー研究, 48, 555–559 (2020.10)

- [10] 干川尚人, 小林康浩, 石原学, 白木厚司, 下馬場朋祿, 伊藤智義, “サービス拒否攻撃演習システムの実装とそのアクティブラーニングシナリオによるセキュリティ技術教育,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J103-B, 180-183 (2020.4)
- [11] T. Nishitsuji, Y. Hosono, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, T. Asaka, “Compression scheme of electro-holography based on the vector quantization of point light sources,” Optics Express 27, 11594-11607 (2019.4)

「国際会議発表」

- [1] M. Abe, N. Hoshikawa, H. Nakayama, T. Ito, A. Shiraki, “Development of a Multi-Projection System for High-Resolution Directional Volumetric Display,” 28th International Display Workshops (IDW' 21), Proc. 522-525 (Online, 2021.12)
- [2] T. Imamura, N. Hoshikawa, H. Nakayama, T. Ito, A. Shiraki, “A New Method for Higher Resolution of Directional Volumetric Displays,” 13th International Conference on 3D Systems and Applications (3DSA 2021), Proc. 94-95, Online (2021.11)
- [3] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Implementation of Dedicated Circuit for Scaled Binary Ghost Imaging,” OSA Imaging and Applied Optics Congress 2021, Online (2021.7)
- [4] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Image Quality Enhancement of Ghost Imaging by Using Gradient Descent,” 27th International Display Workshops (IDW' 20), Proc. 847-849, Online (2020.12)
- [5] N. Hoshikawa, T. Shimobaba, T. Ito, “Trait Extraction Method for Digital Equipment Using Clock Drifts Based on Comparison of Criterion Server,” IEEE 2nd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI 2020), Proc. 190-194, Online (2020.6)
- [6] I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, “Investigation of Single-Pixel Imaging using Recurrent Neural Network,” 11th International Conference on 3D Systems and Applications (3DSA 2019), Sapporo (2019.11)
- [7] K. Komatsubara, N. Hoshikawa, T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Ito, “Proposal of the Implementation of a Camera-Type Wide-Area Surveillance System that Suppresses the Flow of Irrelevant Private Data,” 2019 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS 2019), Proc. 4C-10, Nikko (2019.8)

「特許」

- [1] 下馬場朋祿, 塩見日隆, 伊藤智義, “イメージング方法およびイメージング装置,” 特願 2020-182157 (2020.10)
- [2] 伊藤智義, 下馬場朋祿, 星郁雄, “カメラ,” 特願 2019-230927 (2019.12)

「受賞」

- [1] 研究奨励賞, 干川尚人, 大島達也, 西辻崇, 白木厚司, 伊藤智義, 電子情報通信学会通信ソサイエティネットワークソフトウェア研究会 (2021)
- [2] ネットワークシステム研究賞, 干川尚人, 小松原圭亮, 西辻崇, 伊藤智義, 電子情報通信学会通信ソサイエティネットワークシステム研究会 (2020 年度)
- [3] 若手研究奨励賞, 古井海里, 干川尚人, 下馬場朋祿, 伊藤智義, 電子情報通信学会 通信ソサイエティ ネットワークソフトウェア研究会 (2019)
- [4] Best Poster Award, I. Hoshi, T. Shimobaba, T. Kakue, T. Ito, 11th International Conference on 3D Systems and Applications (3DSA2019) (2019)

(参考)「LSI デザインコンテスト」の表彰 (学生の国際大会: 受賞者はすべて申請者の指導大学院生)

- [1] 優勝, W. Anzai, Y. Ishii, T. Suzuki, “Implementation of inference circuit using multi-layer CNN for Rubik's Cube solver” (2022.3)
- [2] 準優勝, K. Arakaki, M. Takehana, T. Maruyama, “Design and Implementation of Puyo Puyo Learning/Inference Circuit by DQN Using The 4-Layer Neural Network” (2022.3)
- [3] 優勝, S. Watanabe, T. Mizoguchi, Y. Inoue, “Implementation of a Tetris learning circuit using DQN” (2021.3)
- [4] 準優勝, H. Shiomi, T. Hara, D. Yasuki, “Design and implementation of inference/learning circuit using the three-layer neural network for the best move estimation in Backgammon” (2021.3)
- [5] 優勝, S. Oi, S. Kikukawa, K. Tojo, M. Homma, “Implementation of Fashion-MNIST Image Classification Circuit Using Convolutional Neural Network” (2020.3)
- [6] 準優勝, R. Furukawa, S. Sugimoto, T. Suzuki, R. Miura, “Design and Implementation of the Circuit to Judge the Result of Go using CNN” (2020.03)