

令和 6 年 4 月 5 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12164

研究課題名(和文) デジタル回路の「さわれる」遠隔学習システムに関する研究

研究課題名(英文) Research on "Touchable" Remote Learning System of Digital Circuit

研究代表者

藤枝 直輝 (Fujieda, Naoki)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30708425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、デジタル回路を遠隔で学習・演習する際の効果を高めるための、「さわれる」遠隔学習システム SawareruSys を提案した。デジタル回路や FPGA の学習におけるこれまでの遠隔学習システムには、その操作から実際にハードウェアに触れているとの実感を得ることが難しい、という問題点が存在した。提案したシステムでは、安価なコントローラボードを用いて、遠隔環境の演習ボードを操作する。これにより、実地で演習ボードを直接操作する時と同じ感覚で、かつ高価な演習ボードを個人に貸し出すことなく、回路を動作確認できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題を通じて、デジタル回路や FPGA の効率的な遠隔学習のための環境を提案できた。作成したプロトタイプにかかる成果は査読付国際会議での発表を行っており、提案したシステムはオープンソースハードウェアとして、その設計およびソースコードを GitHub で公開している。また、近い将来システムの一般利用も可能となる予定である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed SawareruSys, a "touchable" remote lab system to learn and experience digital circuit and FPGA effectively. It aims to overcome a problem of existing FPGA lab systems, or difficulty of giving student a feeling of touching hardware. We developed an inexpensive controller board that communicates with an FPGA lab board on a remote environment. This enables students to virtually "touch" hardware even in the remote lab environment, without an FPGA lab board in hand.

研究分野：計算機システム

キーワード：FPGA ハードウェア デジタル回路 遠隔学習

### 1. 研究開始当初の背景

令和元年に発生した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の拡大により、人同士の接触を避ける観点から、本邦でもほとんどの大学で講義・実験の遠隔化、オンライン化を迫られることとなった。その中で、特に実験・実習科目においては、いかに実地での実験・実習と同等の教育効果を遠隔環境で達成するかが重要な課題であり、遠隔での効果的な学習・演習システムへの需要が高まっている。また、このようなシステムは、たとえ実地での実験・実習が可能である場合でも、自宅などでの自主学習を可能とすることから、興味のある学習者のより深い学びに繋がり、有用性が高い。

既存のデジタル回路や FPGA (Field Programmable Gate Array) の学習システムの問題点は、その操作から実際にハードウェアに降れているという実感を得ることが難しいことである。既存のシステムの多くは、入力操作に Web インタフェースを使用し、出力は Web インタフェース、Web カメラの映像、またはその両方で確認していた。しかしこの方法では、ソフトウェアのプログラミングとの違いが意識しづらく、実地で直接ボードを操作して演習・実験をする場合と比べ、ハードウェアに対する理解が不十分になるおそれがある。

### 2. 研究の目的

本課題では、1 節で述べた背景を踏まえ、「ハードウェアに触れている実感を与えつつ、しかし高価な実習ボードを貸し出すことのない方法で、デジタル回路の遠隔学習システムを提供し、実地での実験・実習と同等の教育効果を達成することはできるか」ということを、学術的な「問い」として定義した。そして、安価なコントローラボードを制作し、これを用いて遠隔環境の FPGA ボードの入力を操作する、すなわちデジタル回路の「さわれる」遠隔学習システムを構築することで、この「問い」に対してアプローチすることを考えた。本課題の達成により、既存の FPGA 遠隔開発・検証環境に対して提案したシステムを適用することができれば、FPGA を活用できる技術者を広く養成できるようになり、本邦の電子・情報工学分野の発展にも寄与できるものと考えた。

### 3. 研究の方法

本課題では、デジタル回路の「さわれる」遠隔学習システムのプロトタイプを令和 4 年度までに作成し、令和 5 年度に学内に環境を構築した上で、実験科目において希望者に供用することを計画した。プロトタイプの開発にあたっては、利用者の PC に実習ボードとコントローラボードの両方が接続されたスタンドアロン環境を第 1 段階、利用者の PC にコントローラボードを、遠隔サーバに実習ボードを、それぞれ接続した遠隔環境を第 2 段階と定義した。その上で、第 1 段階は令和 3 年度に、第 2 段階は令和 4 年度に、それぞれ開発を完了するものとした。またこれらに付随して、研究代表者が従来より開発していた既存のハードウェア記述言語演習環境との連動についても、研究の全期間で検討した。

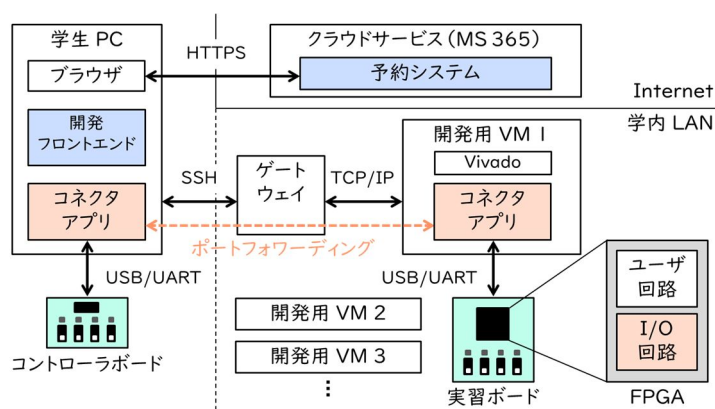


図 1: 構築したプロトタイプの全体構成。

図 1 に、本課題で構築したプロトタイプ第 2 段階の全体構成を示す。本課題において新たに開発した構成要素には、(1) マイコンを搭載したコントローラボード、(2) 通信中継のためのコネクタアプリ、(3) FPGA 上に実装する I/O 回路、(4) FPGA 開発を効率化するための開発フロントエンド、(5) 開発用仮想マシン (VM) を予約するための簡易的な予約システムから構成される。

遠隔操作は、双方のボード間でコマンドをやりとりすることによって実現する。コントローラボードの入力スイッチの操作、あるいは FPGA 上でのユーザ回路からの出力 LED の操作は、コントローラボード上のマイコンや FPGA 上の I/O 回路により、コマンド文字列へと変換される。コネクタアプリは、接続されたボードの認識と、一方で受信したコマンドのもう一方への転送の処

理を行う。コマンドがもう一方のボードに到達すると、それに応じて自身の入出力を更新する。これにより、コントローラボードの入力は FPGA に反映され、FPGA の出力はコントローラボードから確認できるようになる。

構築したプロトタイプは、令和 5 年度の愛知工業大学工学部電気学科電子情報工学専攻の 3 年次実験科目である電子情報工学実験 2 の受講者のうち希望する者に供用し、実験時間外の学習やレポート作成に役立てるものとした。

本節の以降の部分では、開発した構成要素のそれぞれについて、その概要を説明する。

### (1) コントローラボード



図 2: 試作したコントローラボード (第 1 版 ~ 第 4 版)。

コントローラボードは、USB に対応する PIC18F マイコンを搭載したマイコンボードである。マイコンの汎用 I/O ピンとして使用できる全てのピンは、ボードの入出力または USB 信号に割当てられている。研究期間中に図 2 に示す第 1 版から第 4 版までの 4 回の試作を行い、ボードの小面積化、利用できるスイッチの数の追加、接続インタフェースの変更 (USB mini-B から micro-B を経て Type-C へ) を行った。コントローラボードの設計には KiCad を使用し、マイコンに書き込まれる制御プログラムは C 言語で記述している。

### (2) コネクタアプリ

利用者の PC と遠隔の開発サーバでは、それぞれ別々のコネクタアプリを起動して、通信の中継を行う。PC とコントローラボード、サーバと FPGA ボードの通信には、各々で USB-UART (USB を介したシリアル通信) を用いる。一方、PC とサーバとの通信は、SSH ポートフォワードリングを介した TCP/IP 通信によって行う。このプロトコルの違いを吸収し、通信の中継を行うのが、コネクタアプリである。

コネクタアプリではまた、接続されたボードの種類や、ボードが動作しているかどうかを認識するために、定期的に応答要求のコマンドを接続されたボードに送信する。コントローラボードと実習ボードとは、この要求に対してそれぞれ別のコマンドで応答する。もし期待する応答が一定時間内にコネクタアプリによって受信されなければ、タイムアウトとして接続を中断する。

PC 側のコネクタアプリは、利用者が操作することを前提に、C# 言語および WPF (Windows Presentation Foundation) で記述している。サーバ側のコネクタアプリは、サーバに常駐して動作できるように、Python で記述している。

### (3) I/O 回路

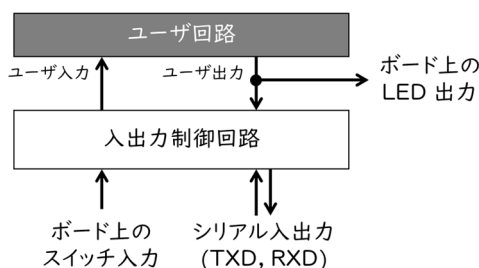


図 3: 実習ボード上の FPGA の内部構造の概要。

実習ボード上の FPGA に書き込む回路は、入出力制御回路とユーザ回路から構成される。図 3 に、入出力制御回路とユーザ回路の関係の概要を示す。ユーザ回路は、利用者自身が設計した回路であり、スイッチの入力や LED・7 セグメント LED の出力をもつ。入出力制御回路は、シリアル通信の入出力 (TXD と RXD) をもっており、サーバのコネクタアプリと接続されたかどうかや、入出力の変化の状況をチェックしている。

FPGA ボードのスイッチ入力は、まず入出力制御回路に渡される。サーバとまだ接続されていない場合は、単にスイッチ入力の情報をユーザ回路の入力として用いる。1 度でも接続された場

合は、入出力制御回路はコントローラボードのスイッチの状態を受け取って保持し、その結果をユーザ回路の入力とする。ユーザ回路の出力は、ボードの LED（または 7 セグメント LED）出力として使われるほか、入出力制御回路にも渡される。サーバと接続されている間、入出力制御回路はユーザ回路の出力の変化を監視し、その結果をサーバに送信する。本課題では、こうした機能をもつ入出力制御回路を VHDL で記述している。

#### (4) 開発フロントエンド

提案するシステムにおいて FPGA に書き込む回路を構築する際は、あらかじめ作りこまれた入出力制御回路に、自由に書き換えられるユーザ回路を組み込んで使うことになる。これを実現する 1 つの方法に動的部分再構成（DPR: Dynamic Partial Reconfiguration）がある。DPR 機能の利用には多数のステップからなるスクリプトを FPGA 開発環境上で実行する必要がある。

提案するシステムでは、この手順を自動化・効率化するためのフロントエンドツールである DRFront を提供する。DRFront は、VHDL または SystemVerilog により利用者が作成した回路記述から入出力信号の定義を読み取り、実習ボード上のスイッチや LED などに割当てするためのユーザインタフェースを提供する。また DRFront は、指定された割当てをもとに、入出力制御回路と接続するためのラッパ回路や、DPR 機能を利用するためのスクリプトを生成する。FPGA 開発環境を DRFront から直接起動することも可能である。これらの機能により、利用者は簡単な操作により効率的な FPGA 開発を行える。DRFront は PC 側のコネクタアプリと同様に、C#言語と WPF を用いて記述されている。また、DRFront の開発にあたっては、研究代表者が従前より開発していた既存の VHDL 演習フロントエンドである GGFront のソフトウェア資産を活用している。

#### (5) 簡易予約システム

提案するシステムでは、利用者の人数に対して実習ボードの枚数が限られていることから、遠隔の開発サーバを時間帯ごとに予約して利用することになる。令和 5 年度に実施したプロトタイプの実験科目履修者への供用では、そのための簡易的な予約システムも併せて構築した。この予約システムは、Microsoft 365 クラウドサービス上の Forms、Excel、および Power Automate を組み合わせた RPA（Robotic Process Automation）システムとして構築している。

### 4. 研究成果

本研究の基本的な性能評価のために、システムの遅延時間評価を行った。遅延時間が短ければ、それだけ利用者の操作が速やかに反映されることとなり、利用者の体験の改善が見込めるためである。提案したシステムと、Web カメラを使用した先行研究を模したシステムとで、遠隔の実習ボード上に出力が現れてから、それが利用者の手で確認できるようになるまでの時間を測定した。測定は愛知工業大学学内の LAN 環境内で行った。その結果、測定された遅延時間は Web カメラを使用した場合の 113 ms に対して、提案したシステムでは 36 ms となり、およそ 72 % の改善がみられた。

この結果を含んだ令和 4 年度までの本課題の成果は、工学教育に関する査読付国際会議 TALE 2023 で発表した。また、提案したシステムの概要や FPGA の遠隔開発環境の構築に関する招待講演を、令和 4 年度・令和 5 年度にそれぞれ実施された第 24 回・第 25 回組込みシステム技術に関するサマースタッフワークショップ（SWEST）にて行った。加えて、研究代表者が従前より開発していた GGFront を用いた VHDL 学習プラットフォームに関する論文が、国内の査読付学会誌に掲載された。当該論文の中では、GGFront のソフトウェア資産が、本課題を含む幅広いデジタル回路学習基盤のためにも利用されつつあることが紹介されている。

また、令和 5 年度に実施したプロトタイプの実験科目履修者への供用は、大きなトラブルなく終了した。1 年間で 35 人がコントローラボードの利用を申請し、のべ 276 枠（1 枠は通常 90 分）のサーバの予約があった。供用を行った効果については継続的な分析が必要ではあるが、実験室の開室時間外にも実験を継続できることへの好意的な反応を確認している。その一方で、遠隔環境に接続するためのセットアップの手順が多く、最初に使い始めるまでのコストが大きいことも指摘された。導入時の学習コストの削減は今後の課題である。

提案したシステムはオープンソースハードウェアとして、その設計およびソースコードを GitHub で公開している。さらに、研究代表者も参画する産学連携機関であるアダプティブコンピューティング研究推進体（ACRi）の協力のもと、同機関が提供する FPGA 遠隔開発環境である ACRi ルームに提案したシステムを適用する準備も進んでおり、近い将来システムの一般利用も可能となる予定である。これらにより、本課題の成果を、本邦の電子・情報工学分野の発展への寄与という形で社会に還元するための道筋を立てることができたと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Naoki Fujieda, Shuichi Ichikawa, Ryusei Oya, Hitomi Kishibe	4. 巻 E106-D
2. 論文標題 Design and implementation of an on-line quality control system for latch-based true random number generator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1940-1950
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2023PAP0001	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 藤枝 直輝, 池田 朋弘, 岩田 啓佑	4. 巻 9
2. 論文標題 手軽でポータブルなVHDL演習環境とその活用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌教育とコンピュータ	6. 最初と最後の頁 11-22
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryusei Oya, Naoki Fujieda, Shuichi Ichikawa
2. 発表標題 An HLS implementation of on-the-fly randomness test for TRNGs
3. 学会等名 10th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤枝直輝
2. 発表標題 FPGA の「さわれる」遠隔学習システムを目指して
3. 学会等名 第24回 組込みシステム技術に関するサマールワークショップ (SWEST24) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村元, 藤枝直輝
2. 発表標題 ビジュアルプログラミングツールの特徴を取り入れたデジタル回路学習ツール
3. 学会等名 情報処理学会 コンピュータと教育研究会 第165回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Fujieda, Atsuki Okuchi
2. 発表標題 A novel remote FPGA lab platform using MCU-based controller board
3. 学会等名 12th International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤枝直輝
2. 発表標題 ACRi ルームのボード100枚はどう動いているか
3. 学会等名 第25回 組込みシステム技術に関するサマーワークショップ (SWEST25) (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>SawareruSys: A "touchable" remote FPGA lab system  <a href="https://github.com/nfproc/SawareruSys">https://github.com/nfproc/SawareruSys</a></p> <p>愛知工業大学 工学部電気学科 電子情報工学専攻 デジタルシステム研究室  <a href="https://aitech.ac.jp/~dslab/">https://aitech.ac.jp/~dslab/</a></p> <p>nfproc (Naoki FUJIEDA) - GitHub  <a href="https://github.com/nfproc/">https://github.com/nfproc/</a></p> <p>ACRi ルーム  <a href="https://gw.acri.c.titech.ac.jp/wp/">https://gw.acri.c.titech.ac.jp/wp/</a></p>
--

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------