

FPGAを用いた組み込みハードウェア設計技術者育成の体系的教育

大塚 祐史*¹, 清水 健太*¹, 清水 尚彦*²

Systematic Education for Development of Embedded Hardware Design Engineer using FPGA

by

Yoshifumi OHTSUKA*¹, Kenta SHIMIZU*¹ and Naohiko SHIMIZU*²

(received on Sep.22, 2014 & accepted on Jan. 13, 2015)

Abstract

An embedded system is a system that has microprocessors to execute specific functions. The hardware of the system and the software that controls the hardware collaboratively work together to provide useful functions. The rapid and worldwide dissemination of the recent embedded systems inevitably requires the engineers whose expertise must reside both in hardware and software. As introductory education, we applied hardware development with FPGA to 3rd grade students or 4th grade students newly assigned to our laboratory. This paper reports the case study of the introductory education conducted in 2012 and 2013.

Keywords: Introductory Education of Laboratory, Linux, FPGA

キーワード: 研究室導入教育, Linux, FPGA

1. 背景

組み込みシステムは、コンピュータを組み込む事で、ある特定の機能を実現したシステムである。コンピュータを構成するハードウェアとそれらのハードを制御するソフトウェアが連携して動く事で、組み込みシステムを使う人々にとって、生活に便利な機能を提供している。近年の組み込みシステムの開発は、高機能な組み込みシステムを短期間で開発しなければならないという課題がある¹⁾。その為、開発期間の短縮化、高性能化、高機能化の問題が組み込みシステムの世界で大きく取り上げられている。しかし、組み込みシステムのスキルを持った技術者が不足しているのが現状である¹⁾。これらの理由から、組み込み技術に長けた多くの技術者が組み込み業界で求められている。組み込み技術者に求められるスキルの例として以下が上げられる²⁾。

- ソフトウェアに関する知識
- ハードウェアに関する知識
- OS(Operating System)の操作に関する知識
- 開発ツールに関する知識
- コミュニケーション能力

組み込み業界のシステム開発では、ソフトウェアに関する知識や

ハードウェアに関する知識を持っているのはもちろんの事であるが、OS操作スキル、開発ツールの知識も必要である。OSに関する知識の中で、Linuxを始めとするオープン・ソース・ソフトウェア(OSS)については、企業・大学等の情報システムへの導入や組み込みシステムでの活用が進展しつつある³⁾。しかし、Linuxがあまり活用されない理由として、知識やノウハウの不足が不足しているという問題があるためである。そのため、我々の研究室では、Linuxの知識を習得する事も一つの目標としている。また近年の複雑化かつ大規模なシステム開発では個人の開発が難しく、グループで開発をするためのコミュニケーション能力も必要であると考えられる。

本稿では、第2章に関連研究、第3章に学習の目的を示す。第4章で2012年度と2013年度の学習事例を示す。第5章で2012年度と2013年度の実装結果を示し、第6章でアンケート結果を示す。第7章で本学習をおこなったアンケートを元に考察し、ハードウェアの設計の知識習得に対してに教育効果があった事を示す。第8章でまとめを行う。

2. 関連研究

例年、我々の研究室は、新しく配属された学生に対し、研究室導入教育を行っている。これは組み込みシステムの技術者に必要な基礎知識に関する学習である。従来の大学等における教育では、以下のようなFPGA(Field-Programmable Gate Array)を用いた実践教育やゲーム開発教育が実施されている。

- 玉真らは、ゲームの社会的・実用的応用を学生たちに考えさせるプログラミング教育を行った⁴⁾。

*1 情報通信学研究科 情報通信学専攻
Graduate School of Information and Telecommunication Engineering,
Course of Information and Telecommunication Engineering
*2 情報通信学部組み込みソフトウェア工学科
School of Information and Telecommunication Engineering,
Department of Embedded Technology

- 大川らは、Android アプリの開発を行い、アプリの処理の一部を FPGA ボードに分散させるアプリ開発を PBL^{*3}形式で行った⁵⁾。
- Lee らは、コンピュータアーキテクチャコースの FPGA システムで、パイプライン化の CPU 設計プロジェクトを行った⁶⁾。
- Kumar らは、FPGA ボードを用いてゲームや画像復号化のシステムを実装するプロジェクトを行った⁷⁾。

これらの教育では、書き換え可能なデバイスである FPGA ボードを使用し、少人数⁴⁾⁵⁾または大人数⁶⁾⁷⁾で、1 セメスターなどの長期間の教育を行っている。我々はこの教育は、これらの実践教育と異なっている点がある。それは FPGA ボード上に学習対象者が考案したゲームを 10 日間ほどの短期間で設計、開発するという教育を行なった点である。この方法をとった最大の理由として、自分達が考案したゲームを一から設計し、実際に動作するゲームを学習者に開発させる事により、学習意欲を向上させるという意図がある。

短期間で学習をするために、上級生が開発環境を準備し、VGA コントローラを提供した。これらの環境を準備した理由は以下の二点である。まず一つに、ハードウェア開発の経験が乏しい学習対象者が短期間で用意するのは困難であると考えた為である。二つ目にハードウェア設計開発でのタイミングチャートの習得は、短期間の教育では難しいと考えた為である。

3. 教育の目的

今回の教育の目的は、背景で述べた組み込み技術者に求められるスキルを、教育の参加者が習得する事である。今回の学習で、動作合成言語の NSL(Next Synthesis Language)^{*4}を選択したのは、RTL 記述よりも抽象的であるため、ハードウェア設計の導入教育に適していると考えた為である。Table 1 は、FPGA のアプリケーションを開発する為に、我々が行った教育を示している。

Table 1 Our education in 2012 and 2013

year	Application(s)	Working style	Term
2012	Games or SDRAM controller	Group	11 days
2013	Games	Individual	10 days

2012 年度は、グループワークで開発を行った。これは、個人の能力の差があるグループメンバーとグループワークで協力しながら開発を行っていかうとした為である。2013 年度は、グループワークでなく、個人で開発を行った。上級生が下級生 1 人に 1 人ずつ付き、開発を行い、分からないところがあれば、一緒に考えるという方針をとった。そして開発終了時に、2012 年度と 2013

^{*3} PBL : プロジェクトベース学習

^{*4} NSL(Next Synthesis Language) : IP-ARCH 社製 CSP 設計仕様に基づく論理回路設計・機能記述言語

^{*5} QuartusII : 米国アルテラ社製の FPGA 開発環境

^{*6} VGA コントローラ : ビデオ出力をする機能

^{*7} RTL(Register Transfer Level) : レジスタ転送レベル

年度の学習対象者にアンケートを取り、グループワークの開発と個人の開発が、ハードウェアの設計の知識習得対して教育効果があった事を示す。

4. 学習事例

4.1 提供した環境

我々は、新しく配属される学生が短期間でハードウェアの学習を行えるように、学生が使用する PC でコンパイル、ボードに転送するのに必要な QuartusII の設定を行い、サンプルの回路をボードに転送して動作するかを確認した。また、ゲームの開発を行う為に、NSL(Next Synthesis Language)⁸⁾で記述された Fig. 1 の VGA コントローラを提供した。学習対象者は、NSL リファレンスマニュアル、VGA コントローラのサンプルコードと FPGA ボードの仕様書を読んで学んだ。また、提供した環境は、2 つのモジュールからなり、拡張可能である。この VGA コントローラを配布した理由は、短期間の開発でハードウェア設計を学ぶ良い方法だと考えた為である。

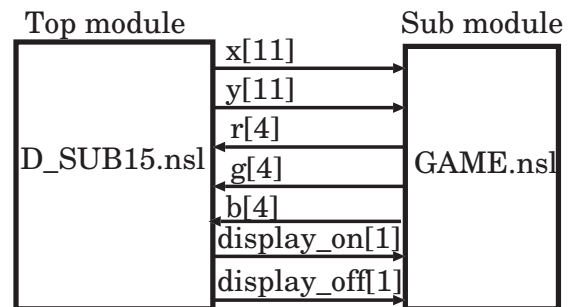


Fig. 1 Educational material:VGA controller¹¹⁾

4.2 Linux を用いたハードウェア設計の流れの学習

学習日の初日に、Linux を用いたハードウェア設計の流れの学習を行った。実際に行った項目は、Table 2 である。項目 5 の回路学習では、我々の研究室で FPGA を始めて学習する人向けのマニュアルがあり、それを元に指導を行った。

4.3 開発工程

ゲームの開発を行うの為に以下の工程を行った。

1. 画面構成図、ブロック図を作成し、ハードウェア構造が理解しやすい仕様を設計する。Fig. 3, Fig. 4 は、作成例である。
2. NSL 言語でコーディングをした。また、NSLCore^{*8 8)}の NSL2v1 を用いて VerilogHDL を動作合成し、QuartusII を用いて FPGA に回路を転送した。Fig. 2 は、設計方法である。
3. ゲームをディスプレイに出力させてデバックを行い、最終的な成果物を FPGA 上に実装した。

^{*8} NSL ファイルから論理合成可能な RTL の実装モデル (Verilog-HDL, VHDL) と機能検証モデル (SystemC) を動作合成するツール

Table 2 ハードウェア設計の流れの学習

項目	学習内容	学習の目的	狙い	効果測定法
1	FPGA の構造学習	FPGA 設計方法と 構造要約	ハードウェア設計での組み込みシステム実装のため	口述試験
2	Linux の使用方法	Linux 上のツール操作習得	Linux の基本操作を覚えて自分で操作するため	目視検査
3	NSL から VerilogHDL 生成方法	RTL コード ^{*7} を生成する操作方法の理解	VerilogHDL の自動生成の操作を覚えて自分で操作するため	目視検査
4	QuartusII ^{*5} の使用方法	開発環境ツールの操作習得	QuartusII の基本操作を覚え、プロジェクト作成、pin の配置、コンパイル、FPGA ボードへの転送方法を、理解させるため	口述試験
5	サンプル回路の学習	組み合わせ回路の理解	ハードウェア設計に必要な知識を習得させるため	口述試験
6	使用する VGA コントローラ ^{*6} の説明	ディスプレイコントローラの知識習得	VGA コントローラがどのように動いているのかを、理解させるため	口述試験



Fig. 2 Design method

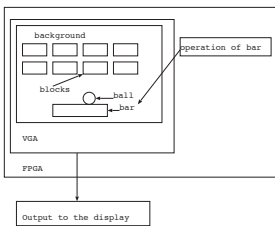


Fig. 3 Screen Structure

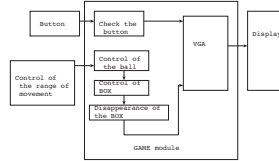


Fig. 4 Block Diagram

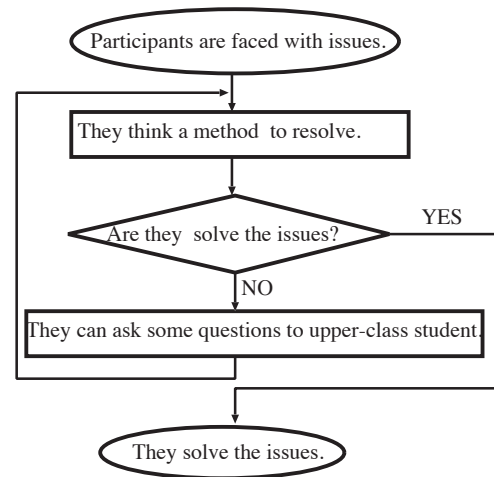


Fig. 5 Educational Method¹¹⁾

4.4 学習方法

我々の研究室導入教育の学習方法を Fig. 5 に示す。まず学生が問題に直面したときに、グループ又は個人で解決方法を考える。それでも解決できない場合は上級生と一緒に問題の解決を考える。この様な方法で学習を進めて行ったのは、できるだけ自主的に活動を行うようにしたかった為である。

4.5 2012 年度の学習事例

2012 年度の導入教育⁹⁾では、Table 3 に示す 4 つのグループに分かれ、11 日間という短い期間で Linux と FPGA を用いた画面出力をするゲームの設計と開発の学習を行った。Table 4 の配属された 3 年生と配属してまだ間もない 4 年生は、C 言語の知識があるものの Linux の使用経験と開発経験がほとんど無い 9 名である。Fig. 6 に示すのは、開発までの 11 日間のスケジュールである。1 日目は、Linux を用いたハードウェアの設計の流れについて教育を行った。2 日目以降は、それぞれのグループに分け、自由に開発を行なった。最終日は、動作確認の為に、各グループのチェック日とした。また、自由開発期間中は、上級生が下級生の質問に答える為に、わからないところは一緒に開発を行った。グループ 1 は、新たに 7segmentLED のモジュールを作成し、機能の拡張を行

ID	Learning Contents	Learning Period										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Development Flow	←										
2	Group Learning		←									
3	Test Operation											←

Fig. 6 Education Schedule in 2012

い、ゲームの作成をした。グループ 2 は、ゲーム作成ではなく、学習の一環として FPGA で SDRAM を活用する為の SDRAM コントローラの制作を行った。制作開始時にはゲーム開発という案もあったが、他の用途に転用できるなど実用性がある為、

今後も使える物として SDRAM コントローラを制作を行った。

Table 3 Examples of Education in 2012

Group ID	Number of persons	Grade	Application(s)
1	3 persons	3rd grade students	Hockey game
2	1 person	3rd grade students	SDRAM controller
3	3 persons	3rd grade students	Breakout game
4	2 persons	4th grade students	Sunke game

Table 4 The participants experience in 2012

Person ID	Group ID	Linux experience	C language experience	Hardware experience
1	1	No	Yes	No
2	1	No	Yes	No
3	1	No	Yes	No
4	2	Yes	Yes	Yes
5	3	No	Yes	No
6	3	No	Yes	No
7	3	No	Yes	No
8	4	Yes	Yes	No
9	4	Yes	Yes	No

4.6 2013 年度の学習事例

ID	Learning Contents	Learning Period									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Development Flow	←									
2	Group Learning		←								→
3	Test Operation										←

Fig. 7 Education Schedule in 2013

2013 年度の導入教育¹⁰⁾では、Table 5 に示す個人に分かれて、10 日間という短い期間で Linux と FPGA を用いた画面出力をするゲームの設計と開発の学習を行った。Table 6 の配属された 3 年生は、C 言語の知識はあるものの Linux の使用経験がない者が 2 名、ロボットコンテストなどに参加し経験豊富な者が 2 名である。Fig. 7 に示すのは、開発までの 10 日間の実際のスケジュールである。1 日目は、Linux を用いたハードウェアの設計の流れについて教育を行った。2 日目以降は、それぞれの個人に分かれ、自由に開発を行なった。最終日は、動作確認の為に、個人のチェック日とした。経験のある生徒は、VGA コントローラを新規で作成し、ゲームを作成していた。また、自由開発期間中は、上級生が下級生の質問に答える為に、各個人に上級生が担当になり、わからないところは一緒に開発を行った。担当の上級生がいなときは、その場にいる上級生に質問する形をとった。

Table 5 Examples of Education in 2013

Person ID	Grade	Development condition	Application(s)
1	3rd grade students	Reuse	Breakout game
2	3rd grade students	Reuse	Hockey game
3	3rd grade students	Fresh	Gobang game
4	3rd grade students	Fresh	Trump game

Table 6 The participants experience in 2013

person ID	Linux experience	C language experience	Hardware experience
1	No	Yes	No
2	No	Yes	No
3	Yes	Yes	Yes
4	Yes	Yes	Yes

4.7 学習時に起きた問題

- Table 4, Table 6 の対象者で、ハードウェア、QuartusII と Linux の知識がない人は、QuartusII と Linux の操作に手間取り、NSL の習得が遅れた。
- Table 4 の対象者は、2012 年度のグループ学習時にメンバーが思い通りに集まらなかった。
- Table 4 の対象者は、2012 年度のグループ学習時にメンバーが思い通りに集まらなかった事でメンバー同士で作成したコードの内容が伝わらず、作業に支障をきたした。
- Table 4, Table 6 の対象者は、自由開発期間中のスケジュールの組み方に問題があった。
- Table 6 の対象者は、初対面の上級生とのコミュニケーションがあまりとれなかった。

4.8 学習時に起きた問題の解決方法

知識の面で分からないところは、Fig. 5 で示したように、上級生に質問をして解決を図った。以下が指導した方法である。

- NSL 言語の使い方を、研究室内の資料を使いながら説明した。
- Linux と QuartusII の使い方の説明行ったあとも、何度も使い方の質問があったため、一緒に操作しながら使い方を説明した。
- 分からない仕様またはソースコードがあれば、ホワイトボードに図や説明を書き、指導した。

5. 実装結果

5.1 2012 年度の実装結果

4 つのグループは、11 日間で Table 3 のハードウェアを設計し、実装を行った。グループ 1, 2, は FPGA ボード上に実装し、VGA

出力させ、実際に遊ぶ事ができるゲームを作成できた。グループ 3 は、SDRAM の仕様を満たすハードウェアを設計できた。グループ 4 は時間が足りずにゲームを実装できなかった。

5.2 2013 年度の実装結果

個人で開発を行った 4 人は、10 日間で Table 5 のハードウェアを設計し、実装を行った。2013 年度の個人 1, 2 は 2012 年度のグループ 1, 3 のゲームの拡張を行い実装できた。スタート画面、終了画面の追加や新しいステージの追加といった拡張を行った。個人 3 は、FPGA ボード上に実装し、VGA 出力させ、遊べるゲームを作成できた。個人 4 は、トランプの絵柄を VGA に出力する事はできたが、ゲームとしては完成せず、すべての機能を実装できなかった。

5.3 開発規模

Table 7 は、2012 年度と 2013 年度の開発規模を表すコード行数である。Table 7 の VerilogHDL のコードは、NSL のコードを NSLCore で動作合成したものである。また、FPGA では、VerilogHDL のコードで実装されている。2012 年度は、グループでの開発を行い、2013 年度は、個人での開発を行った。

Table 7 The code lineage of development scale in 2012 and 2013 ¹¹⁾

group or person	developed	
	NSL lineage	blended VerilogHDL lineage
group 1	662	3557
group 2	702	4234
group 3	544	4842
group 4	342	2958
person 1	1423	6232
person 2	659	3837
person 3	784	4832
person 4	1164	6675

5.4 作業時間

Table 8 は、2012 年度と 2013 年度の実働作業時間である。グループの実作業時間は、グループ内で個人が作業した時間の合計を示している。グループ 4 は、グループ内の時間調整ができず、画面の表示のみと言う結果になった。

Table 8 Working Hours in 2012 and 2013 ¹¹⁾

group of person	working hours
group 1	12.5
group 2	35.0
group 3	12.8
group 4	3.5
person 1	10.0
person 2	20.0
person 3	15.0
person 4	15.0

6. アンケート結果

我々は、今回開発に携わった学生を対象に Table 9 の共通のアンケートを行なった。Table 10 は、アンケートの選択肢である。この選択肢を元に対象者全体の平均を結果として出した。

Table 9 Common questionnaires

・ The teaching effectiveness
1. Can you use NSL language?
2. Can you use Linux?
3. Can you use QuartusII?
4. Do you understand hardware design?
・ The one's problem - solving powers
5. Do you get one's problem - solving powers?
6. Do you get one's assessment powers of the situation?
7. Do you get communication ability?
8. Do you get logical thinking ability?

Table 10 answer method of the questionnaires

Value of Evaluate	Evaluate Contents (%)
1	I don't think so. (0%)
2	I don't think that it says either so. (25%)
3	Neither. (50%)
4	I think that it says either so. (75%)
5	I think so. (100%)

目的別の教育効果を Fig. 8 に、問題解決能力を Fig. 9 に示す。以下にアンケートの結果の分析を上げる。

6.1 目的別の教育効果

3 章で述べた五つの目的に対し、教育効果があったかを Fig. 8, Fig. 9 のアンケートから読み取る。今回のアンケートの教育効果のある数値の目標は 60% 以上とする。学習前と変わらない結果を 0% とすると、60% という数値は学習効果があったものと考えられる。2012 年度では、ハードウェアの設計、Linux の操作などが全体的に知識の習得度の項目が 60% 以上なので、教育効果があることが分かる。これは、画面に出力され、遊ぶことのできるゲームを作成するという目標に向かって、楽しみながら作成できた結果だと考える。2013 年度は、2012 年度の数値と比べると、2013 年度の結果が低い事がわかる。これは上級生が新しく配属された学生に対し、上手く説明やコミュニケーションが取れなかった事が原因だと考える。また既に作成されていたものを流用し、拡張と改良を行ったため、楽しみながら学習できなかったのかもしれない。特に一番低かったハードウェアの設計の理解は、FPGA や設計に関する説明が足りなかったと考える。しかし 2013 年度の成果物は 2012 年度の成果物と比較すると、ブロックゲームとホッケーゲームは機能追加により完成度が高い。経験者の二人は作成するゲームの仕様を自らが決めることにより、より高度な NSL の記

述法はもちろんのこと、ハードウェアにおけるモジュール設計や、FPGA 上のメモリの詳細な仕様など、更に発展的な分野の学習を幅広く取り扱うことができた。

6.2 問題解決能力

2012 年度と 2013 年度の Fig. 9 を参照に比べると、コミュニケーション能力の項目以外、全てが 60% 以上を達成しているのであり、あまり差がない事がわかる。2013 年度のコミュニケーション項目の低さは、基本的に個人での開発なので、同級生との親睦を深めにくく、初対面の上級生とあまり会話ができなかった事が原因であると考えられる。

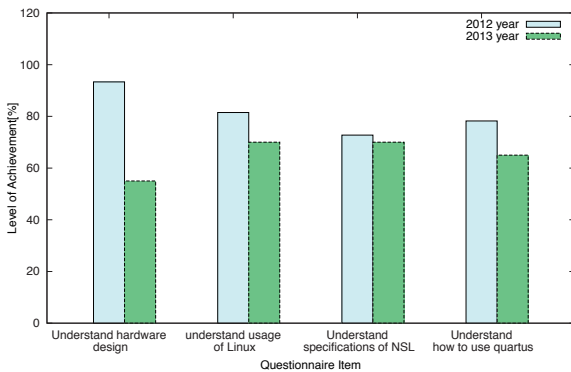


Fig. 8 The Result of Teaching Effectiveness ¹¹⁾

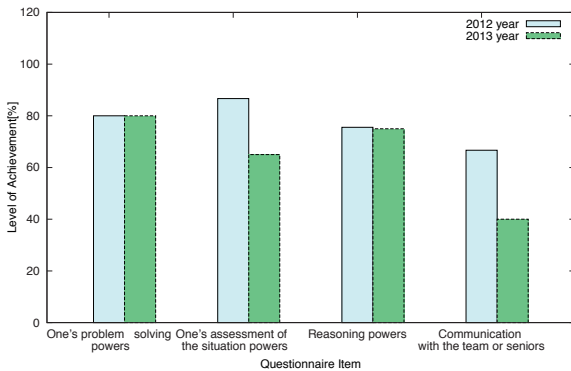


Fig. 9 The Result of One's Problem - Solving Powers ¹¹⁾

7. 考察

我々が行った研究室の導入教育では、アンケートの結果から 2012 年度、2013 年度の双方で、FPGA を用いたハードウェアの設計と開発の経験、Linux を用いた開発の理解、NSL の仕様の理解、QuartusII などのツールの理解といった四つの項目に対し能力向上が見られた。以下に 2 年間の学習を個々に考察する。

7.1 2012 年度について

2012 年度は、多くのグループが、一部機能を未実装のまま当日を迎えてしまった。これは初めての短期間でのプロジェクトで、自由開発期間中のスケジュールの組み方に問題があった為である。しかし、アンケートの結果より、全体的に知識の習得はできたと考える。

7.2 2013 年度について

2013 年度は、アンケートの結果から、ハードウェアの設計の理解度が低く、問題解決能力は高い評価だった。問題解決能力が高かった理由は、開発期間内に 4 人全員が去年に比べ、各々でゲームの内容を追求し、完成度の高いゲームを実装したからである。ハードウェア設計の理解度が低い理由は、数名が前年度に作成したプログラムを利用し、改良を行った為と考えられる。

今回の 2 つの事例の一番の反省点は、コミュニケーションが欠けていたことである。コミュニケーションが欠けていた理由として、2012 年度の場合、グループで共同作業する時間を上手く調整できなかった為である。そして、配属直後の開発という事もあり、互いに遠慮がちな面があった事が考えられる。2013 年度はグループ開発ではなく、個人開発であったので、初対面の上級生と一対一になった為と考えられる。今後はこれらの反省点を生かし、導入教育を行う前に上級生が事前準備をしっかりと行い、制作や個人開発期間中のスケジュール組立てもフォローをできるようにする。そしてコミュニケーションの向上に注力を置き、学習効果の向上に努める。

8. まとめ

今回我々は、研究室の導入教育として過去 2 年間の Linux と FPGA を用いたハードウェア設計と開発の学習事例を紹介した。2 つの事例では、FPGA ボード上にアプリケーションを実装することに取り組んだ。Table 4 と Table 6 から読み取れるように、Group2, Person3 と Person4 は、既に知識があったため難しい課題に取り組んだ。また、すべての人が FPGA ボード上にアプリケーションを実装することはできなかった。しかし、考察で述べたように我々が設定した目標を達成できたため、ハードウェアの設計に必要な知識を習得できたと言える。開発中において問題に直面しても、上級生と一緒に Linux や QuartusII を操作しながら指導し、ホワイトボードで図を用いながら説明を行い解決できた。事前知識のなかった学生も多かったが、事例のような上級生が事前準備した物ならばハードウェア設計をできるようになった。もともと知識のあった学生も自分の実力を高めようと更なるレベルアップの為に難しい問題に挑戦し、ハードウェア設計の知識習得するという成果を上げている。今回の結果が出なかった事例を生かし、後学のために、4.7 節に述べた直面した問題を説明する研究室の内の操作書、設計マニュアル、サンプルコードの説明をより充実させ、今後も新しく配属された学生に対しても引き続き導入教育を行っていきたい。

参考文献

- 1) IPA 独立行政法人 情報処理推進機構, "2012 年度「ソフトウェア産業の実態把握に関する調査」調査報告書", (2013)
- 2) 一般社団法人 組込みシステム技術協会, "機関誌 Bulletin JASA「新人社員に求められる組込み技術知識について」", (2011)
- 3) 経済産業省 商務情報政策局 情報処理振興課, "e-Japan 戦略 II におけるオープンソース (Linux) の導入をはじめとした IT 利活用のポイント", (2003)
- 4) 玉真 昭男, 富田 寿人, "シリアスゲーム開発を課題としたプログラミング教育", 情報処理学会研究報告 コンピュータと教育研究会報告 2009-CE-102(20), 1-5, 2009-12-04
- 5) 大川 猛, 高野 創司, 植竹 大地, "Android アプリケーションと FPGA の連携を支援するハード・ソフト混在設計環境", 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE technical report, 信学技報 113(498), 295-300, 2014-03-15
- 6) Jong Hyuk Lee, Seung Eun Lee, Heon Chang Yu, Taeweon Suh, "Pipelined CPU Design With FPGA in Teaching Computer Architecture", IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 55, NO. 3, AUGUST 2012
- 7) Akash Kumar, Shakith Fernando, Rajesh C Panicker, "Project-Based Learning in Embedded Systems Education Using an FPGA Platform", IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 56, NO. 4, NOVEMBER 2013
- 8) オーバートーン株式会社, "NSL リファレンスマニュアル", (2011)
- 9) 梶原 太一, 野元 一馬, 何 スウショウ, 青山 卓也, 玉城 良, 廣瀬 翔太, 津端 祐亮, 秋山 大樹, 大塚 祐史, 清水 健太, 清水 尚彦, "研究室導入教育の開発事例", 第 38 回パルテノン研究会, (2012)
- 10) 梶山 真理乃, 早川 翔, 古川 拓実, 河野 壮志, 清水 尚彦, "研究室導入教育の開発事例" 第 39 回パルテノン研究会, (2013)
- 11) Yoshifumi Ohtsuka, Kenta Shimizu, Yuichi Okuyama and Naohiko Shimizu, "Rapid Method for Embedded Systems Hardware and Software Education", Proceedings of the International Conference on Computer Science, Computer Engineering, and Education Technologies, Kuala Lumpur, Malaysia, p90-98, (2014)

付録 A 実装したゲームの動作画面

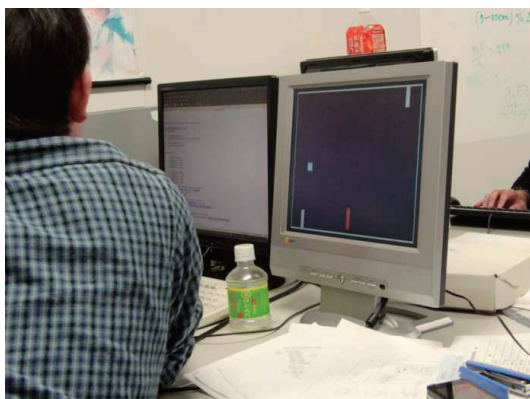


Fig. 10 The Developed Hockey Game Screen in 2012



Fig. 11 The Developed Breakout Game Screen in 2012

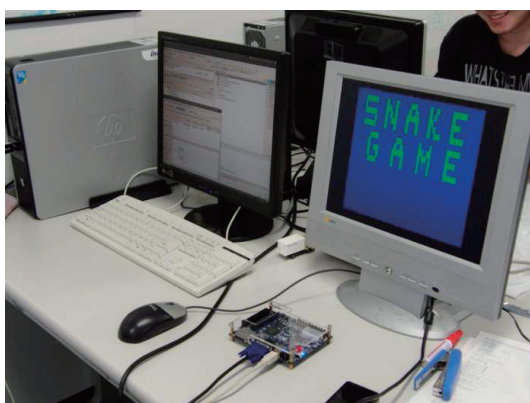


Fig. 12 The Developed Snake Game Screen in 2012



Fig. 13 The Developed Breakout Game Screen in 2013

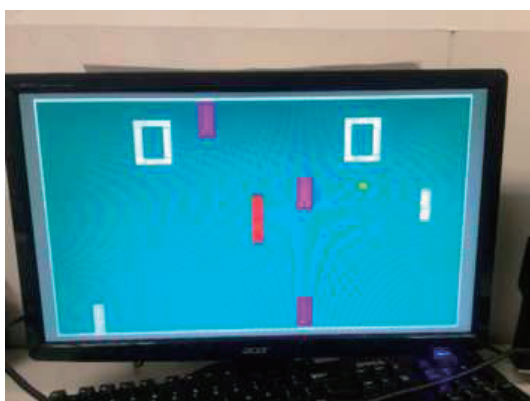


Fig. 14 The Developed Hockey Game Screen in 2013

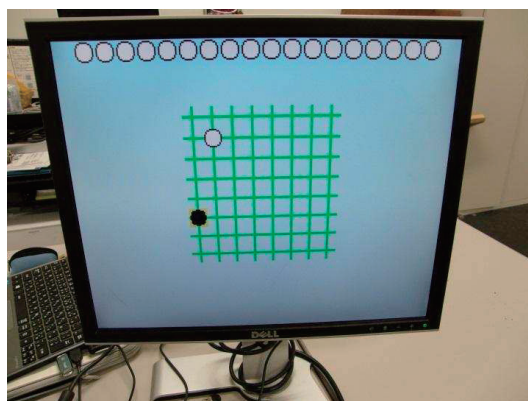


Fig. 15 The Developed Trump Game Screen in 2013