

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500833

研究課題名（和文） 質の高い情報通信技術者を育成するための総合的な教材の開発

研究課題名（英文） Development of the quality teaching materials for the ICT engineer.

研究代表者

重村 哲至（SHIGEMURA TETSUJI）

徳山工業高等専門学校・情報電子工学科・教授

研究者番号：80215970

研究成果の概要（和文）：

最新の FPGA を用いて教育用のパーソナルコンピュータ(PC)を開発した。この PC は学生でも設計を理解できるシンプルな構成であるが、オペレーティングシステムや言語処理系を実行する能力を持っている。これを使用して、学生はプログラムを作成することと、この設計内容を学習することの両方が可能である。このハードウェア設計データやシステムプログラムのソースコードは、全てオープンソースとして公開し、学生の学習に利用できる。

研究成果の概要（英文）：

The educational personal computer (PC) was developed using the latest FPGA. This PC is very simple so that students can understand its design, but it has the capability to execute an operating system and a language processor. Using this, students can program it and can study the design method of the PC. All the source codes of the hardware design data and the system programs are exhibited as an open source, and are applicable to a student's study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1170,000
2011年度	900,000	270,000	1170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2300,000	690,000	2990,000

研究分野：情報工学

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学

キーワード：工学教育・教育用コンピュータ・組み込み・FPGA・情報処理教育・技術者教育

1. 研究開始当初の背景

産業や経済のソフト化と IT 化が進む現在、高度な情報通信技術を身につけた人材の育成は、「今後のわが国の産業競争力、及び国家の発展、安全保障をも大きく左右する重要な国家的政策課題」（日本経団連：産学官連携による高度な情報通信人材の育成強化に向けて(2005)）とされた。しかし、同じ年に

総務省から発表された「高度 ICT 人材の育成の推進に向けて」では、日本の情報通信技術者は、IT 分野 42 万人、組み込み分野 10 万人が不足しているとされ、十分な数の情報通信技術者の育成ができていない状況であった。一方で、ソフトウェア技術者の能力差は 100 倍とも言われ、深刻な技術者不足の解決には、質の高い人材を輩出することも重要で

ある。このような技術者になるためには、情報処理技術の核となるコンピュータの全体像を「実感をもって」学習することが欠かせないと我々は考えていた。

そこで、このような目的に使用できる教材を開発した。開発したのはノイマン型コンピュータの原理を学習するための教育用マイコン(TeC)と、コンピュータシステムの全体像を学習するための教育用パソコン(TaC)である。

TeC はノイマン型コンピュータの動作原理を機械語の学習を通して学ぶことを目的に平成14年頃に開発された8ビットのマイクロコンピュータである。コンソールパネルを備えており、ハードウェアだけでCPU内部やメモリの状態を確認しながらプログラムをステップ実行できる特徴がある。TeCはVHSビデオカセットケースに収納できる大きさに組み立てられており学生が携帯可能である。新入生は各自の私物としてTeCを購入し授業中の演習でも自宅学習でも使用することができる。徳山工業高等専門学校・情報電子工学科等の授業で長期間に渡って使用され成果をあげてきた。

しかし、TeCはコンソールパネルの使いやすさを最優先に設計されたため、実用性が考慮されていない。オペレーティングシステムや言語処理系などを実行するにはメモリが少なすぎる。システムプログラムを含むコンピュータシステムの全体像を理解するための教材としては不十分である。

そこで、TeCのアーキテクチャを拡張した16ビットパソコンTaCの開発を開始した。新しいアーキテクチャはTeCのそれを拡張したものであるため、低学年でTeCを使用した経験を持つ学生はすぐに理解できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は開発途中のTaCを完成することである。具体的には、これまで既製のFPGAトレーニングボードを流用していたハードウェアを専用開発したものに置き換えること、TaC用の汎用オペレーティングシステムを開発すること、言語処理系を開発しTaC上でプログラムのセルフ開発を可能にすることである。つまり、パソコンのハードウェアから言語処理系までの全てを手作りすることになる。

TaCは教育用に単純化したパソコンである。ハードウェアの設計データ、オペレーティングシステムと言語処理系のソースコードを学生が短期間で読むことが可能な規模で実現し、学生の教材にすることを目的にしている。

まず、学生はTaCを使用してプログラム開発を行い、それが任意のプログラムを実行できることを確認し、一般的なパソコンと原理

的に同じものであることを体験する。

次に、TaCの回路設計データやシステムプログラムのソースコードを読み、自分が記述したプログラムが言語処理系を経てどのように変換され、オペレーティングシステムやハードウェアの上でどのように実行されていたのかを理解する。

このような教育用のパソコンを開発し教材にすることによって、学生がコンピュータシステムの全体像を「実感をもって」深く理解することが可能になる。

3. 研究の方法

まず、TaCのハードウェアを新たに開発する。最新のFPGAを採用することにより安価な下位品種でも主記憶まで含めたTaCの全回路を1チップに内蔵できる可能性がある。ハードディスクの代用に安価なフラッシュメモリカードを用いる。これらにより、ハードウェアの小型化と低価格化が可能になり、多くの教育機関で導入しやすくする。また、教育用にオペレーティングシステムのカーネルの内部までトレース実行しながら観察ができるような機能を検討し実装する。

次に、TaC用の汎用オペレーティングシステム(TaC-OS)を開発する。TaC-OSは、DOSにマルチタスク機能を付加したものの、初期のUNIX程度のものである。TaC-OSの記述には、我々が独自に開発した教育用システム記述言語C--を用いる。C--言語はC言語に似ているが、初心者が学習しやすいように改良したものである。

最後に、C--言語の処理系をTaC-OSに移植し、TaCでプログラム開発ができる状態にする。言語処理系は、元々、C言語で記述されUNIX上で動作していた。これを、C--言語で記述し直すことでTaC-OSに移植できる。この処理系は当初からC--言語に書き換えることを前提に開発されているので容易に書き換えることができるはずである。

以上のようにして開発されたTaCは必要な台数を製作し、徳山工業高等専門学校・情報電子工学科の授業や演習で使用する。使用中で本教材の有用性を検証する。その後は、他の教育機関への普及を目指す。

4. 研究成果

平成22年度にTaCのハードウェアの開発を行った。最新のFPGAとしてXilinx社のSpartan-6を採用することにした。Spartanシリーズは業界でもトップクラスの実績がある他に、TeC等での使用実績もあるためである。Spartan-6の中でも2層のプリント基板に実装が可能なQFPパッケージを利用できるXC6SLX9を使用することにした。プリント基板の設計では、2層基板を採用し基板のコストを安くした他、表面実装部品をなるべく

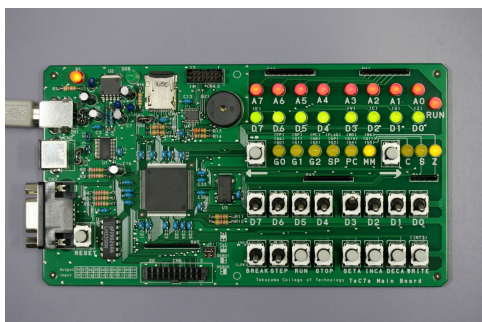


図1 TaCのハードウェア

使用しないような工夫を凝らした。これによって、自分用 TaC の組立て作業の大部分を学生が自ら行うことが可能になり、組み立てコストを低減することもできた。

XC6SLX9 は TaC を実現するために十分な回路規模を持っている。VHDL で記述した TaC 回路を実装してもまだ十分な余裕があり、教育用マイコン TeC の回路を同居させることも可能であることが分かった。そこで、新しい TaC は、TeC の機能も内蔵したものにすることにした。これにより学生は、低学年で TeC として使用したハードウェアを高学年では TaC として使用できるようになった。TeC として使用するか TaC として使用するかは、プリント基板上のジャンパーによって切り替える。

開発した TaC のハードウェアを図 1 に示す。TeC を同居させたことからコンソールパネルを持つことになり、一見、TeC に見えるが TaC が必要とするフラッシュメモ리카ードのスロットや、ディスプレイ、キーボード等の周辺装置を接続するためのコネクタを持っている。TaC として使用する場合は、図 2 に示すように周辺装置を接続して使用する。

TaC として使用する場合、コンソールパネルは 16 ビットのコンソールパネルとして動作する。TaC モードでコンソールパネルを使用することにより、オペレーティングシステム・カーネルの内部までトレース実行することができる。

コンソールパネルを付加したことで TaC の回路設計が複雑化し学生が回路を読みにくくなることが懸念された。そこで、コンソールパネルの制御に CPU のマイクロプログラムを用いることにし、回路の複雑化を抑え設計データの可読性を保っている。そのため、CPU が停止している時しか、コンソールパネルの表示が変化しない仕様になっている。

なお、新型の TaC は TeC としても使用できること、価格も従来の TeC とほぼ同等であることから、徳山工業高等専門学校・情報電子工学科では平成 23 年度以降の新入生に TaC を TeC として使用させている。学生の私物、本プロジェクトで製作したものを合わせると、平成 25 年の前期時点で既に 150 台程



図2 周辺装置を接続した様子

度の新型 TaC が製造されている。

平成 23 年度はオペレーティングシステムの開発を行う予定であった。しかし、開発を開始してみると TaC の 1 ワード 16 ビット構成のメモリ配置では 8 ビット単位でデータが配置された FAT16 ファイルシステムと互換性のあるカーネルを記述するために都合が悪いことが分かった。

そこで、TaC のアーキテクチャを大幅に見直し、アドレッシングの単位をワードからバイトに変更した。これに伴い、主記憶が従来の 64 キロワードから半分の 64 キロバイトに変更された。従来のワードデータに加えてバイトデータも扱えるように TaC のアーキテクチャを大幅に変更することになった。また、使用できるメモリが半分に減ってしまったため、機械語プログラムを小さくする工夫が必要になった。

まず、バイトデータが扱えるように TaC の機械語命令セットを拡張した。バイトデータを扱う必要とメリットがある場面は、ファイルから読み取ったバッファ上のデータをアクセスするときか、ASCII 文字列を使用する場合である。これらは、C 言語プログラムの視点からは配列アクセスである。そこでバイトデータは主記憶上の配列アクセスだけで使用できることとし、TaC の機械語命令セットにバイト配列をアクセスするためのアドレッシングモードを追加した。

次に、メモリを節約するために TaC の機械語命令セットを拡張した。C コンパイラが出力するアセンブリ言語プログラムを観察すると、-1, 0, 1 のような小さな定数や、ベースレジスタの直前や直後を参照する短いオフセットが目立つ。そこで、4 ビット定数、4 ビットオフセットを命令セットに追加した。更にベースレジスタとしてフレームポインタを使用する場合は、ワード単位のオフセットも利用可能にし、4 ビットオフセット

でアクセスできる範囲を広くとった。これらの工夫により、機械語のサイズが従来の 2/3 程度に縮小されるようになった。

以上の拡張によって命令セットが非常に複雑化してしまっていたが、CPU のマイクロプログラムで多くの例外を処理し回路の変更は最小限に留めることで、TaC の回路設計データの可読性を保つようにした。また、複雑なアドレッシングモードの選択もアセンブラが自動的に行うようにし、アセンブリ言語ソースは、TeC の知識で読めるように工夫した。これまでにを行ったアーキテクチャの変更について、平成 24 年 12 月に情報処理学会・コンピュータと教育研究会で報告した。

TaC のアーキテクチャが刷新され VHDL で記述された TaC の CPU や内部回路に大規模な改造を行う必要が生じた。また、TaC のアーキテクチャを意識して設計されていた C--言語の言語仕様もバイトデータが扱えるように大幅な変更が必要になった。これに伴って言語処理系も大規模な改造を行った。これらの改造を平成 24 年度の前半までに完了し、オペレーティングシステムの開発が行えるようになった。

平成 24 年度の後半からはオペレーティングシステムの開発を開始した。 これまでに、ディスパッチャとセマフォ機構、メモリ管理機構が完成しこれらのソースコードは高専本科のオペレーティングシステムの授業でサンプルとして使用している。また、FAT16 ファイルシステムも読み出し専用で使用できるようになっている。

高専専攻科の演習科目では作成途中の TaC-OS を組み込み用 OS として整理しなおしたものと C--言語のクロス開発環境を使用し、組み込みアプリケーションの開発演習を行なっている。これのために、C--言語の解説資料と、TaC-OS (組み込み版) のユーザーズマニュアルを整備した。

これまでに開発した回路設計データ、プログラム、ドキュメント等はホームページで公開する予定である。既に、所属組織に本プロジェクトに関連して開発したプログラム等の著作権の扱いについて確認を行った。今後、整理できたものから順に公開し、広く教材として利用できるようにする。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

①高山泰博、重村哲至、柳澤秀明、新田貴之、古賀崇了、奥本幸、山田健仁、高専-大学連携による組み込みソフトウェア関連技術教育の高度化の試み、徳山高専研究紀要第 35 号、査読無、2012, pp.1-4

[学会発表] (計 6 件)

① 重村哲至、山田健仁、機械語教育用マイコン TeC とシリーズ化した教育用パソコン TaC のアーキテクチャ、情報処理学会研究報告、コンピュータと教育 (Vol.2012-CE-117 No.9), 2012/12/9, 熊本県熊本市

② Yasuhiro Takayama, Takayuki Nitta, Takanori Koga, Hideaki Yanagisawa, Tetsuji Shigemura, Miyuki Okumoto and Takehito Yamada, "Curriculum Design and Faculty Development for Embedded Software Technology Education," Proceedings of 6th International Symposium on Advances in Technology Education (ISATE 2012), 6 pages, September 19-21, 2012, Kitakyushu.

③ Yasuhiro Takayama, Takanori Koga, Takayuki Nitta, Hideaki Yanagisawa, Tetsuji Shigemura, "Curriculum Design for Engineering Education on Embedded-System Based on Broad Partnership with University, Corporation and Local School," Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering 2012 (IEEE TALE 2012), pp.61-66, Hong Kong Special Administrative Region of the People's Republic of China, August 2012.

④ 森重僚太, 重村哲至, C-- コンパイラの IA-32 への移植, 平成 22 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, pp.372-373, 2010/10/23, 岡山県総社市

[その他]

ホームページ等

教育用コンピュータ (TeC) のサイト :

<http://tec.tokuyama.ac.jp/TeC/>

重村研究室のホームページ :

<http://www2.tokuyama.ac.jp/giga/~sigemura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

重村 哲至 (SHIGEMURA TETSUJI)

徳山工業高等専門学校・情報電子工学科・教授

研究者番号 : 80215970

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

山田 健仁 (YAMADA TAKEHITO)

徳山工業高等専門学校・情報電子工学科・教授

研究者番号 : 40280458