

## 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24年6月14日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500885

研究課題名（和文）ハードウェアの解る組込みソフトウェア技術者育成のための実学教育方式の研究

研究課題名（英文）A Research on Training Methods for Embedded Software Engineers with Hardware Knowledge

研究代表者

三井 浩康（MITSUI HIROYASU）

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：70328532

研究成果の概要（和文）：ハードウェア（HW）技術の知識を有する組込みソフトウェア（SW）技術者を育成する教育に必要なカリキュラムおよび実験方式の研究を行った。以下の課題を目標に実験方式の提案と試作評価を行い、得られた成果を学会等で発表した。

- 1) 組込みシステム開発に必要な技術を実験により段階的に習得する実験方式を提案する。
- 2) システム記述言語であるSystemCを用いてHW/SW協調設計の基礎技術を習得する実験を提案し、試作・評価する。並行して、教育用の簡易動作合成ツールの開発を進める。
- 3) 組込みシステムのネットワーク化、M2M（Machine to Machine）化の動向を踏まえて、インターネット遠隔計測・制御実験、無線センサネットワーク実験を提案し、試作・評価を行う。

研究成果の概要（英文）：This research was performed on experimental methods and curricula required for training embedded software engineers with knowledge of hardware technologies. A set of experimental method was proposed on the following subjects, and its prototyping and evaluation was carried out. The results were presented at related journals.

- 1) A method of step-by-step experiment to learn technologies required to understand and develop embedded systems.
- 2) An experiment to learn the basics of HW / SW co-design method using SystemC language was proposed. In parallel, a simple educational tool for behavior synthesis was developed.
- 3) Corresponding to the tendency of networked embedded systems and M2M (Machine to Machine), experiments related to remote sensing and control via the Internet and wireless sensor networks were developed and evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：科学教育

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：組込み技術者教育，動作合成，センサネットワーク，M2Mシステム，協調設計

## 1. 研究開始当初の背景

本研究に着手した当初は、情報技術 (IT) の進歩でマイクロコンピュータを組込んだ組込みシステム製品が普及し、組込み機器のソフトウェア (以下、組込み SW と略す) が複雑化し、開発規模・コストの増大と品質が課題になっていた。経済産業省が毎年、取り纏めている組込みソフトウェア産業実態調査報告書では組込み SW 技術者の不足が指摘された。組込みシステムは製造業の「もの作り」において大きな位置を占める一方で、大学教育ではパソコン中心の SW 技術者教育が行われ、産業界の要望と乖離があった。

一部の大学では組込みシステム教育の専門学科を設けているが、情報系の学科ではマイクロコンピュータを用いた実習・実験を部分的に実施してきたが、急速に発展した組込み機器、組込みネットワークに対する対応は立ち遅れている。

図 1 に示す M2M (Machine to Machine) システムは人手を介さずに機器同士が通信する技術として注目され、クラウドとの連携も始まっている。センサや家電、スマートメータなどのネットワーク化にともない、マイクロコンピュータ、無線通信、センサ素子や家電制御、省電力化などのハードウェア (HW) 技術を理解できる組込みソフトウェア (SW) 技術者が求められている。

筆者は、組込みシステム向けの教育強化として、組込み SW 技術教育に有効なカリキュラムおよび学生実験方式を研究してきた。今回は、組込みシステムのネットワーク化、センサネットワークなどの無線ネットワークも踏まえたカリキュラムと組込みシステム実験を提供して、HW の解る組込み SW 技術者教育に研究するために、「HW 技術を理解できる組込み SW 技術者を育成するための教育内容と実験方式」を提案することを目的とした。

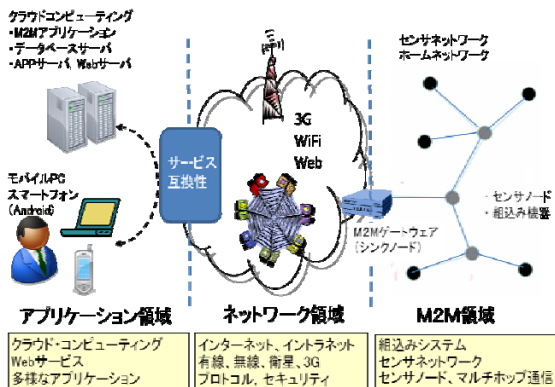


図 1 M2M システムの概要

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、情報系の学科で SW 技術を学ぶ学生に、組込みシステムのシステム技術、組込み機器に用いられる HW 知識や制御技術、無線やデバイスの知識、組込み機器固有の開発手法を習得させ、組込み SW 製造業への就業力強化を図ることである。

従来での大学での教育、実験のみでは就業先の満たせないため講義、実験科目を補強し、実学中心に以下の教育を実施する。

- (1) HW を設計できなくてもよいが、HW の概要を理解し、制御できるようにする。
- (2) HW と SW を協調して設計できるようにシステム開発、HW/SW 協調設計、トレードオフへの理解を深める。
- (3) ネットワーク接続型組込みシステムに必要な技術を理解し、修得する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 組込み SW 技術習得内容の検討

組込み SW 技術者に求められる知識や技術の概要を図 2 に示す。

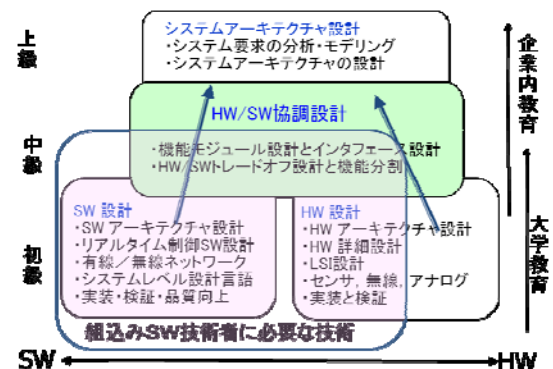


図 2 組込みシステム技術者

本研究では、図 2 の初級の組込み SW 設計技術者の教育を主眼とした。

1) HW の解る組込み SW 技術者の育成に必要なとなる基本技術を整理し、修得が必要な基礎技術を洗い出し、実験方式を検討する。

2) 組込みシステムの上流設計でのシステム設計、HW と SW の機能分担設計の理解のため、システム設計言語である SystemC を用いた HW/SW 協調設計の基礎習得実験を検討する。

3) HW/SW 協調設計実験用に簡易動作合成ツールの開発を進め、SystemC で記述した論理回路を FPGA (Field Programmable Gate Array : 書き換え LSI) に書き込むことを可能にする。

4) 組込みシステムのネットワーク化に対応してセンサや遠隔機器を LAN で制御する遠隔計測・制御する実験、および無線センサネットワーク実験方式を提案し、試作・評価する。

図 3 に今回、検討したカリキュラムの概要を示す。

**【従来の情報系教育科目例】**

	講義内容	講義形態
情報工学 カリキュラム (RD学系の例)	ハードウェア基礎(電気回路, 論理回路)	講義
	コンピュータ基礎(CPU, メモリ, I/O, BIOS, 機械語, アセンブリ言語)	講義
	形式言語, オートマトン	講義
	C言語, Java言語, プログラミング	講義と演習
	ソフトウェア工学, OS基礎(タスク管理, 制御, その他各種機構)	講義
	ネットワーク(TCP/IP, LAN, WAN)	講義
	データベース(RDBS, SQL), サーバ(App, Web, DBサーバ)	講義と実験
	アナログとデジタル, マイクロコンピュータ	講義
	電気計測, IC回路, FPGA設計, センサ, CPUアーキテクチャ	実験と実習
	ライトレスロボット実験(マルチタスク, HW制御プログラム)	実験

**【組み系教育を強化】**

	講義内容	講義形態
組み系 SW工学 カリキュラム	マイコン組み込みSW開発(リアルタイムOS, C/Java, XML)	講義と実験
	組み込みHW開発手法(論理回路, 逐次処理と並列処理, LSI設計)	講義と実験
	組み込みシステムアーキテクチャ設計手法(モデリング, オブジェクト指向, アーキテクチャ)	講義と実験
	HW/SW 協調設計開発の手法(HW/SWトレードオフ, 機能分割)	講義と実験
	無線・有線ネットワーク, クラウド技術(RFID, ZigBee, 組み込みAndroid, インターネット)	講義と実験

図 3 情報系コースの組み込みシステム科目強化

従来の情報系コースの教育は、ソフトウェア技術の講義および PC 上でのプログラミング演習が主であった。組み込みシステム関連では、マイコンソフトウェアや FPGA 設計などの追加例はあるが、組み込みシステムネットワーク、無線ネットワーク、HW/SW 協調設計関連の実習はまだ少ない。

本研究では、組み込みシステム技術の習得を行うための科目と実験として図3の下部に示す項目を想定した。実験については、図4に示すように段階的に実施することで教育効果を上げる工夫をした。

**4. 研究成果**

**(1) マイコンによる波形変換実験**

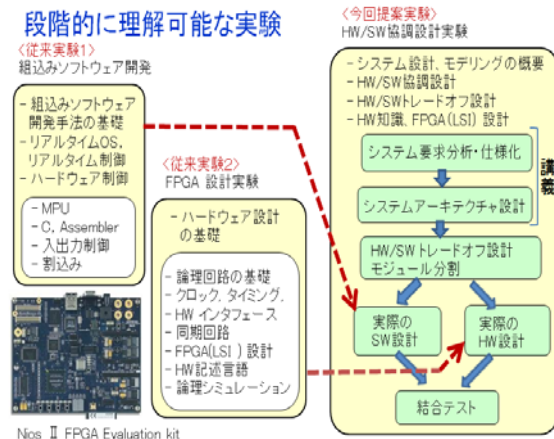
A/D 変換器, D/A 変換器を内蔵したマイコンボードとパソコン(PC)を用いて、アナログとデジタルの違いを理解する実験である。ア

ナログ電圧波形をデジタル化して PC に取りこみ, C 言語で組んだプログラムでデータを加工後, D/A コンバータや PWM(Pulse Width Modulation) で出力し, 波形を観測する. 実験を通じて, A/D 変換における標準化, 量子化, 量子化誤差・雑音の基本知識, マイコンによる入出力制御方法を習得する.

**(2) HW/SW 協調設計実験**

組み込みシステム開発では, 期間短縮, コスト削減のため, HW/SW 協調設計の導入が増えている. 図5に示す SW/HW 強調設計実験を構築した. 上流段階ではシステム記述言語である SystemC を用いて, HW と SW を区別せずに機能モジュール設計をする. 各モジュールの機能・性能のシミュレーション後, HW, SW トレードオフを行って機能分担を決め, HW と SW を並行開発する. この HW/SW 協調設計手順の概要を実験で理解させる. 本実験では, 教材として JPEG エンコーダの SW, HW モジュールを用意しておき, 性能の評価, トレードオフ設計, LSI 設計の基本的流れを理解させるとともに, SW の逐次処理と HW の並列処理の違い, クロックや同期などの概念を体験させる. 図6に本実験を実施した結果の例を示す.

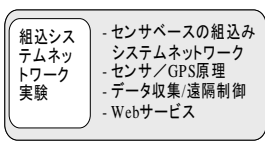
**段階的に理解可能な実験**



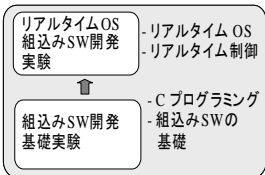
Nos II FPGA Evaluation kit

図 5 情報系コースの組み込みシステム科目強化

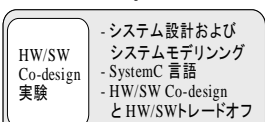
**組み込みシステムネットワーク実験**



**組み込みSW開発実験**



**HW/SW Co-design 実験**



**組み込みHW設計実験**

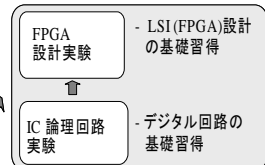


図 4 段階的に実施可能な組み込みシステム実験方式

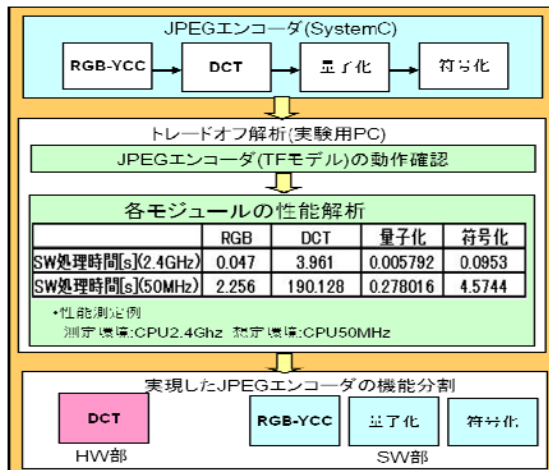


図 6 HW/SW 協調設計実験の結果例

### (3) SystemC-Verilog HDL トランスレータ

企業ではシステムレベル設計言語を用いた HW/SW 協調設計の普及が進んでいる。しかし、使用する設計ツール、例えば動作合成ツールは高価であり教育機関での購入が困難である、このため学生が上流設計からの設計体験をすることが困難である。

本研究では、学生にシステムレベル設計言語を用いた HW/SW 協調設計を体験させるために、SystemC-VerilogHDL トランスレータと称する簡易動作合成ツールを開発した。トランスレータ開発のためにフロントエンド、ミドルエンドは新規に開発し、バックエンドは Design Methodology Lab 提供の論理合成 CAD ツール「Simple Logic Design System(SLDS)」の機構を利用した。図 7 に開発したツールの概要を示す。基本システムの仕組みの開発を完了したが、SystemC で論理回路を設計する規約の

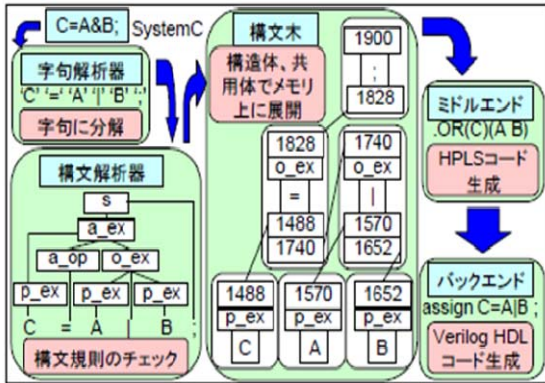


図 7 SystemC-Verilog-HDL トランスレータ

開発は今後も継続する。

### (4) センサネットワークシステム構築実験

組込みシステムのネットワーク化に対応して以下の実験を提案し、試作と評価を行った。

#### ① センサノードの基本機能実験

センサ、LED、リレー制御回路を持ち、HTTP サーバ機能を搭載したマイコンボードをセンサノードと見なし LAN に接続する。複数のグループで実験を行い、各実験グループは図 8 の Group1 に示す構成で PC からブラウザを用いてセンサノードを制御する。LAN の IP アドレス、サブネット、UDP、TCP の理解、LAN 経由でのセンサや機器を制御する方法などセンサノード構築に必要な基本機能を学ぶ。

#### ② インターネット遠隔計測・制御実験

①の実験で、各グループが構築したサブシステムをハブ、ルータで接続し、図 8 に示す LAN と WAN からなる疑似広域網を作る。各グループの PC のブラウザから任意のセンサノードにアクセスして遠隔計測・制御実験を行う。ルータによるルーティング機能、ルーティングテーブルの役割を理解し、インターネット経由の遠隔制御を理解する。

#### ③ 無線センサネットワーク構築

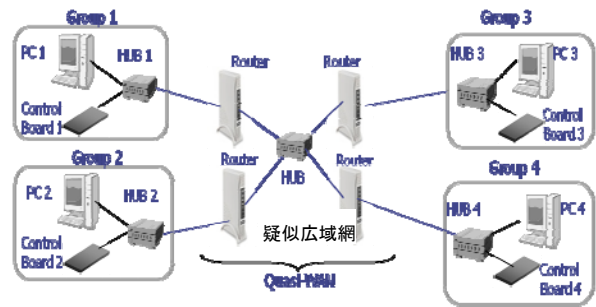


図 8 インターネット経由遠隔計測・制御実験

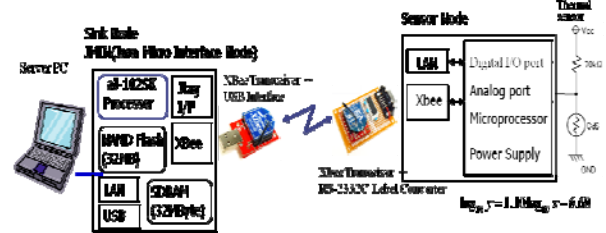


図 9 無線センサネットワーク実験

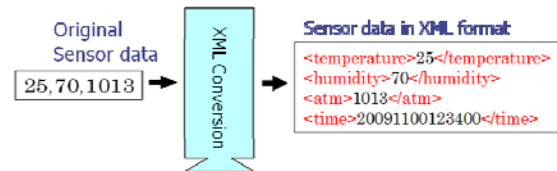


図 10 OSGi バンドル機能の利用

ZigBee 規格準拠の無線送受信モジュールを用いたセンサネットワークを構築し、基本動作を確認する。実験環境を図 9 に示す。温・湿度センサからセンサデータを取り込み、デジタル値へ変換し、データ収集と蓄積を行うシステムを構築する。センサノードの機能、シンクノード（ゲートウェイ）の機能を理解させる。シンクノード上で実行するアプリケーション（ミドルウェア）は、Java で組み、OSGi (Open System Gateway initiative) バンドルと XML データ形式を用いて構築した。センサデータは PC に送り、データ処理アプリケーションで可視化した。OSGI はアプリケーションの接続インタフェースを標準化する技術で、バンドルという単位で SW モジュールの着脱や遠隔管理を可能にする。バンドルの例を図 10 に示す。

### (5) まとめ

マイコンによる A/D・D/A 変換実験、センサネットワークシステム構築実験は、学部向け授業に適用し、理解を深める教材として有用であった。センサの種類、データ処理プログラムの内容を学生に考えさせることが今後の課題である。HW/SW 協調設計実験は大学院生に試行させ、実用化の見通しを得た。

## 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7件)

- ① Hiroyasu Mitsui, Hisao Koizumi : Use of Student Experiments for Teaching the Basics of Sensor Networks Including M2M Technologies, Proc. of International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology, 2012, pp. 120-125, 査読有
- ② 佐藤賢文, 三井浩康 : SLDS 機構を用いた SystemC-Verilog HDL トランスレータの開発, 情報処理学会 研第 155 回 SLDM・第 24 回 EMB 合同発表会 (ETNET2012) 論文集 vol. 26 pp. 1-6, 2012, 査読有
- ③ 小林敬太, 佐藤賢文, 三井浩康 : 学生を対象とした組込みソフトウェア技術者育成のための HW/SW トレードオフ実験方式の提案, 2010 年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 1698-1703, 2010, 査読なし
- ④ 三井浩康 : ハードウェアと M2M 技術のわかる組込みソフトウェア技術者育成のための学生実験方式, 東京電機大学総合研究所年報, 2010 年度版, pp. 121-126, 2011, 査読なし
- ⑤ Hiroyasu Mitsui, H. Kambe, H. Koizumi : Student Experiments for Learning Basic M2M Technologies by Implementing Sensor Network Systems, Proc. of 9<sup>th</sup> International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, DOI:10.1109/ITHEE.2010.5480082, pp. 257-264, 2010, 査読有
- ⑥ 三井浩康, 神戸英利, 小泉寿男 : M2M 技術の基礎習得のためのセンサネットワークシステム構築学生実験, 2009 年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 1698-1703, 2009, 査読なし
- ⑦ Hiroyasu Mitsui, H. Kambe, H. Koizumi. Use of Student Experiments for Teaching Embedded Software Development Including HW/SW Co-Design IEEE Transaction of Education Vol. 52, No. 3, pp. 436-443, 2009, 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① Hiroyasu Mitsui : Use of Student Experiments for Teaching Sensor Networks Including M2M Technologies, Proc. of International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology, 2012. 1.28. Nara, Japan

- ② Hiroyasu Mitsui : Student Experiments for Learning Basic M2M Technologies by Implementing Sensor Network Systems, 9<sup>th</sup> International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, 2010.4.30, Cappadocia, Turkey

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三井 浩康 (MITSUI HIROYASU)  
東京電機大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 7 0 3 2 8 5 3 2

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし

