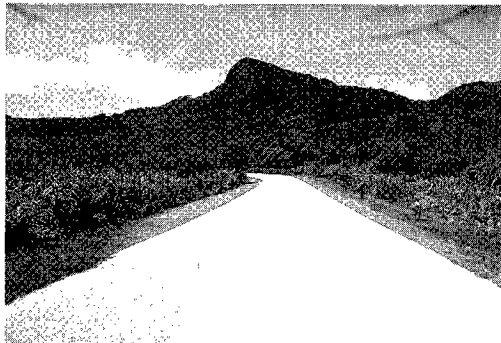


# 道しるべ：組込みシステムの設計技術とその研究



富山 宏之 安浦 寛人

九州大学大学院システム情報科学研究科

## 組込みシステムとは？

「私たちは日常生活の中で1日平均50個以上の組込みシステム（英語では Embedded System）を使用しています」といわれて、すぐに納得できる読者はどのくらいいらっしゃるでしょうか？ 大半の読者は、「そもそも組込みシステムとは何なのか」、「本当にそんなに多くの組込みシステムを使っているのか」という疑問を持たれることと思います。まず、この2つの疑問に答えることから話しを始めたいと思います。

本誌の1997年10月号で「組込みシステム開発の現状」という特集記事が組まれており、その中では組込みシステムのことを、各種の機器に組み込まれてその制御を行う計算機システム（原文では、コンピュータシステムと書かれている）であると説明しています<sup>1)</sup>。表-1に組込みシステムが組み込まれている機器の例を挙げます。いかがでしょうか？ 炊飯器と航空管制システムがともに組込みシステムであるといわれて、余計、混乱したかもしれません。組込みシステムと一言でいっても、その分野はあまりにも広く、また、皆が納得するような組込みシステムという用語の定義はまだありません。

では、もう1度表を見ていただきたいと思います。パーソナルコンピュータ（PC）やワークステーション（WS）などの汎用計算機がありません。PCのように、不特定多数のアプリケーション（実際に個々のユーザが普段実行するアプリケーションは特定少数かもしれませんが、ユーザによって実行するアプリケーションは異なるでしょう）が実行される計算機システムのことは組込みシステムと呼

びません。別の言い方をすると、あらかじめ決められた処理だけを行い、ユーザが機能を追加することが基本的でない計算機システムが組込みシステムであるといえます。

次に、組込みシステムの外観と構造について考えてみましょう。先ほど、組込みシステムは計算機システムであると書きましたが、不思議な気がした人が多かったことと思います。たとえば、炊飯器や洗濯機にはキーボードも大きなディスプレイもありませんし、おおよそ計算機と呼ぶのに似つかわしくない外観をしています。しかし、炊飯器を分解してみると、マイクロプロセッサを中心とした電子回路があり、その上で火加減の調節、タイマ予約、ユーザインタフェースなどを処理するソフトウェアが動作し、計算を行っています。プリント基盤上にプロセッサ、メモリ、I/O インタフェース回路など複数のLSI（大規模集積回路）が搭載され、その上でプログラムが動作しているという点では、組込みシステムと汎用計算機システムは共通しています。ただ、組込みシステムはアプリケーションが限定されているので、定められた機能を効率よく実行できる構造を持っています。

## 組込みシステムの特徴

ここまでで、組込みシステムとは何かということ、私たちが日常生活で数多くの組込みシステムを使用していること、また、組込みシステムが私たちの日常生活に深くかかわっていることは納得していただけたと思います。身の回りに多くの組込みシステムが存在しているということは、当然ながら、世の中にはそれらを設計している多くの人が存在しています。次に、組込みシステムを設計する立場から、組込みシステムの特徴について考えてみたいと思います。

家電製品	テレビ、ビデオ、ラジオ、洗濯機、冷蔵庫、炊飯器、エアコン、電子レンジ、ポット、カメラ、便器
玩具	テレビゲーム、携帯型ゲーム、パチンコ台
通信機器	電話、携帯電話、PHS、ファックス
事務機器	プリンタ、コピー機、ワープロ、電卓
自動車	エンジン、サスペンション、エアバッグ、アンチロックブレーキ、ナビゲーション
建築物	エレベータ、空調制御システム、照明制御システム、セキュリティ監視システム
商店	バーコード読み取り装置、レジスタ、自動販売機
工場	FAシステム、産業用ロボット、自動倉庫システム
交通	道路・鉄道・海上・航空管制システム、電車、船、航空機
経済	自動預貯金システム、電子マネーシステム、株式取引システム

表-1 組込みシステムの応用例

組込みシステムの特徴を考える上で留意すべきことは、その多様性です。半導体技術の進歩により、LSIの性能当たりの価格は年々低下してきており、その結果、さまざまな電気・電子製品に組込みシステムが使われるようになりました。また、今後も、組込みシステムのアプリケーションはますます増えると予想されます。各々のアプリケーションはそれぞれ異なる機能を持ち、値段も異なります。以下、組込みシステムの特徴をいくつか挙げますが、それらはすべての組込みシステムの共通する特徴ではなく、該当しないアプリケーションも多々あることに留意してください。

組込みシステムの最も大きな特徴は、機能が限定されているということです。ユーザが機能を追加することは基本的にありません。そのため、プログラムは通常ROM（読出し専用メモリ）に格納され、製品の出荷後にプログラムが書き換えられることはありません。よって、組込みシステムのハードウェアを設計する際には、その特定のプログラムを効率よく実行できるようなアーキテクチャを採用することで、コストや性能を最適化することができます。炊飯器に組み込まれたシステムは、決して複雑な偏微分方程式の計算はしないのです。

汎用計算機システムが高性能指向であるのに対し、組込みシステムは低コスト指向、あるいは、低消費電力指向です。特に、家電製品のように、一般の消費者が直接購入する組込みシステムの場合にはコストを低く抑えることはきわめて重要です。5万円のビデオデッキに5万円の組込みシステムは搭載できません。組込みシステム設計では多くの場合、要求性能を満たした上で、コストを最小化することが設計目標となります。また、携帯機器向けの組込みシステムでは、電池の寿命を長くするため、消費電力を最小化することが重要になってきます。

組込みシステムと汎用計算機システムでは、システムのパフォーマンスに対する捉え方も異なります。汎用計算機システム

では多くの場合、平均スループットのことを性能と捉えます。しかし、組込みシステムの多くはリアルタイムシステムであり、外部からの入力に対して、ある定められた時間内で処理を完了しなければなりません。たとえば、車載エアバッグの制御の場合、車が衝突してから人間がフロントガラスやハンドルに衝突するまでの間に、エアバッグが開かなければ意味がありません。リアルタイムシステムの場合、平均スループットを高めることよりも、リアルタイム制約を必ず満たすこと、つまり、最悪時の処理時間を制約時間よりも短くすることが重要です。

また、一般の消費者が直接購入する製品用の組込みシステムを設計する場合には、設計期間を短くすることもきわめて重要です。製品のライフサイクルは短くなる傾向にあるため、短期間で設計を終了し、タイムリーに製品を市場に投入することが、市場を獲得する成功の鍵になります。

医療システムや交通システムなど大きく人命にかかわる場合、あるいは、経済システムなど社会的影響が大きい場合には、信頼性や安全性を高めることが最優先事項となります。

このように、組込みシステムの設計に課される要求は、それぞれの応用に応じてさまざまに変化します。このような、さまざまな設計要求の変化に対応できる設計手法の確立が求められています。

## 組込みシステムの設計手法



組込みシステムの設計は日本の得意分野の1つであるといわれています。なぜなら、組込みシステムの設計は製品の企画・開発やLSIの製造と密接に関係しているため、大手家電メーカーに代表されるように、それらすべてを1つ

の企業内で行う垂直統合型の産業構造に適しているからです。しかし、日本の組込みシステムの設計生産性が諸外国と比較して必ずしも優れているとはいえず、なによりつつあるのが昨今の状況です。

その理由は、従来の組込みシステム設計が、技術体系あるいは学問体系というものを持たず、どちらかといえば熟練した設計者の勘と経験に依存した「匠の世界」であったことが大きな理由です。一方、ヨーロッパや米国では、組込みシステムを今後の戦略的製品と位置付け、産官学が共同でその体系的設計手法とそのための設計ツールの研究開発に乗り出しているのです。

組込みシステムの設計と一言でいっても、さまざまな要素から構成されています。多くの組込みシステムは、中心的な処理を行う専用または汎用のプロセッサ、プログラムや固定データを格納するROM、プログラムの実行に利用される記憶領域としてのRAM、各種の専用回路などのハードウェア部分とその上で動作するソフトウェアから構成されています。

ある応用分野に対して、組込みシステムで実現すべき機能（仕様）が決定されると、設計者はまずハードウェアとソフトウェアの分割を行います。実現すべき機能のどの部分をソフトウェアで実現し、どの部分を専用回路でハードウェアとして直接実現するかを決定するわけです。このとき、システム全体の性能とシステムの大きさ（プロセッサの種類、プログラムを格納するメモリの容量、専用回路の大きさなどから決まる）のトレードオフを考えることとなります。また、消費電力のことも注意しなければなりません。コスト、性能、消費電力などの制約を考えて、使用するプロセッサを決定することも大きな仕事です。さらに、ハードウェア部分とソフトウェア部分を設計し、両者がうまく協調して機能を実現しているかどうかを検証することも必要です。

このような設計作業は、ハードウェア/ソフトウェア・コデザイン<sup>2)</sup>と呼ばれる設計技術です。ハードウェアとソフトウェアの分割、そのときのシステムの性能やコストの見積もり、さらにハードウェア/ソフトウェア・コミュニケーションによる設計の検証などが、新しい技術としてここ数年で実用化され始めました。

専用回路の設計には、高位合成と呼ばれる技術が開発されています。C言語のようなプログラミング言語で記述された機能を専用回路のハードウェアへ変換する技術です。通信や信号処理に対しては、実用的な技術となっています。

要求仕様に見合った既存のプロセッサが存在しなければ、独自の専用プロセッサを設計しなければなりません。特殊目的に適合する独自プロセッサを短期間に効率よく設計する技術も重要です。一般にプロセッサの設計は、難しいといわれています。そこで、プロセッサのアーキテクチャをある程度固定して、命令セットやレジスタ数、テ

タパス幅などを可変パラメータとしてチューニングする技術が開発されています。独自のプロセッサを開発するとそれに対応してコンパイラやデバッガなどのソフトウェアも設計しなくてはなりません。このような、ソフトウェアの開発も同時に考えないといけない点が、独自プロセッサ開発の難しい点です。豊橋技術科学大学と大阪大学で開発されているPEAS <URL:http://vlsilab.ics.es.osaka-u.ac.jp> や九州大学のソフトコアプロセッサ <URL:http://kasuga.csce.kyushu-u.ac.jp/~codesign/> など、我が国でも新しい技術が開発されています。

組込みシステムで使われるソフトウェアは、組込みソフトウェアと呼ばれます。この分野も、汎用計算機上のソフトウェアとは、大きく異なった技術が必要です。利用できるメモリの量が制限されるので、プログラムを小さく実現することが要求されます。組込みシステム向けのオペレーティングシステムも数多く開発されています。μITRON <URL:http://tron.um.u-tokyo.ac.jp/TRON/ITRON/home-j.html> など我が国で開発され、広く利用されているものもあります。リアルタイム性の実現や電源の制御など、汎用のオペレーティングシステムとは違ったいろいろな技術が組み合わされた面白い分野となっています。

組込みシステム用のプログラミング言語も今後のホットな研究テーマです。現在はC言語やアセンブリ言語が主流ですが、オブジェクト指向型の言語（C++、Java）が注目されています。プログラマが、各変数の利用するビット幅を指定するような新しい型の言語 Valen-C <URL:http://kasuga.csce.kyushu-u.ac.jp/~codesign/> なども開発されています。

プログラミング言語とともに重要なのがコンパイラの技術です。性能はもちろん重要ですが、メモリを含めたチップ面積や消費電力の削減もコンパイラの工夫でできるのが面白いところです。たとえば、キャッシュミス減らすようにプログラムの配置を最適化することで、性能向上と電力削減を同時に達成することができます。独自プロセッサに対しては、リターゲッタブルコンパイラの技術が重要です。プロセッサのパラメータ変更をコンパイラに反映させて、独自プロセッサに対するコンパイラを自動的に生成する技術で、すでに部分的に実用化されています。

このように、組込みシステムの設計は、ハードウェアだけでなくプロセッサアーキテクチャ、コンパイラ、オペレーティングシステム、言語など計算機工学におけるすべての基本的な要素技術を含んでいます。別の言葉でいえば、自らの計算機システムの世界を構築する技術なのです。

## 研究の動向

組込みシステムの設計技術に関する最新の研究は、以

下の国際会議や論文誌を通じて知ることができます。

組込みシステムに関する代表的な会議の1つに Embedded System Conference (ESC) があります。ESC は会議だけでなく、企業による組込みシステム設計支援ツールの展示会も大々的に行われています。また、Workshop on Languages, Compilers, and Tools for Embedded Systems (LCTES) では、プログラミング言語、コンパイラ、リアルタイム OS、ハードウェア/ソフトウェア・コデザインなど、組込みシステム設計に関するさまざまなトピックについて、最新の研究が発表されています。International Symposium on System Synthesis (ISSS) では組込みシステムの上流設計技術や自動合成技術に関する研究発表が行われています。International Workshop on Hardware/Software Codesign (CODES) はハードウェア/ソフトウェア・コデザインに、Real-Time Systems Symposium (RTSS) はリアルタイム処理に関する学会で、組込みシステムはその重要な設計対象になっています。また、International Conference on Computer Aided Design (ICCAD), Design Automation Conference (DAC), Design Automation and Test in Europe (DATE), Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC) など、LSI や電子システムの設計支援技術に関する大きな国際会議でも、組込みシステムを対象としたセッションが設けられています。

組込みシステムの設計自動化技術を対象とした論文誌に、Kluwer Academic Publishers が発行する Journal of Design Automation for Embedded Systems があります。

また、IEEE Transactions on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on VLSI Systems, ならびに、ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems は、LSI や電子システムの設計技術と設計自動化技術に関する論文誌で、組込みシステムを対象とした論文が数多く掲載されています。IEEE Transactions on Computers は計算機システム全般に関する論文誌で、リアルタイム処理やコンパイラに関する論文が掲載されています。

組込みシステム開発やハードウェア/ソフトウェア・コデザインに関しては、本誌やさまざまな学会誌等で特集が組まれているので参考になると思います<sup>1)~4)</sup>。組込みシステムの上流設計手法に関しては、カリフォルニア大学アーバイン校の Gajski 教授が率いる研究グループが、システム記述言語から設計方法論まで幅広く研究成果を本にまとめています<sup>5)</sup>。ハードウェア/ソフトウェア・コデザインに関する文献<sup>6)</sup>と<sup>7)</sup>は、各章で著者が異なり、内容も独立しています。世界中の研究機関におけるコデザインの研究動向を知りたい読者に適しているでしょう。組込みプロセッサ向けのコンパイル技術に関する研究は文献<sup>8)</sup>にまとめられています。この本も各章が独立した内容になっています。

<URL:http://kasuga.csce.kyushu-u.ac.jp/~tomiyama/researchers.

html>には、関係するホームページへのリンクがありますので、ご利用ください。また、関連会議へのリンクは、<URL:http://kasuga.csce.kyushu-u.ac.jp/~tomiyama/conferences.html>にありますのでこちらもご利用ください。

## 今後の展開



これからの組込みシステムは、プロセッサ、メモリ、専用回路、センサなどが1つのチップに集積されるシステム LSI として実現されることになると考えられます<sup>9)</sup>。従来、部品としての半導体から最終製品としてシステムとしての半導体へと、半導体産業の性格付けが大きく変わろうとしています。組込みシステムの設計技術の確立は、日本の半導体産業の構造改革でもあるのです。また、PC やワークステーションなど汎用計算機分野で米国に押されっぱなしの計算機工学の分野においても、組込みシステムの設計技術は、アーキテクチャやオペレーティングシステム、言語、コンパイラなどの分野で世界を席巻する新しい標準を生み出せる研究分野であるということもできます。

今後、電子マネーのような経済システム、電子投票のような政治システム、都市管理システムのような社会基盤システムにも組込みシステムの技術が多用されます。このような、社会の意思決定や安定に直接的に影響するシステムを支える技術は、十分な安全性と信頼性を確保する必要があります。無批判に、外国の技術をブラックボックスとして使うことは、大きな社会混乱を引き起こす原因を作る可能性があります。このような意味で、組込みシステムの設計技術は、我が国の電子情報産業や社会システムの将来を左右する基盤技術と位置付けることもできます。最後に、国の産業政策上からも社会の安全性の確保という意味からも、組込みシステム関連技術は、きわめて重要な技術分野であることを指摘したいと思います。

### 参考文献

- 1) 特集「組込みシステム開発の現状」, 情報処理, Vol.38, No.10 (Oct. 1997).
- 2) 特集「ハードウェア/ソフトウェア・コデザイン」, 情報処理, Vol.36, No.7 (July 1995).
- 3) 特集「システムLSI - マルチメディア社会を支えるIC技術 -」, 電子情報通信学会誌, Vol.81, No.11 (Nov. 1998).
- 4) Special Issue on Hardware/Software Co-Design, Proceedings of IEEE, Vol.85, No.3 (Mar. 1997).
- 5) Gajski, D. D., Vahid, F., Narayan, S. and Gong, J.: Specification and Design of Embedded Systems, Prentice Hall (1994).
- 6) Staunstrup, J. and Wolf, W. (ed.): Hardware/Software Co-Design: Principles and Practice, Kluwer Academic Publishers (1995).
- 7) Micheli, D. and Sami, M. (ed.): Hardware/Software Co-Design, Kluwer Academic Publishers (1996).
- 8) Marwedel, P. and Goossens, G. (ed.): Code Generation for Embedded Processors, Kluwer Academic Publishers (1995).

(平成 11 年 3 月 15 日受付)