

情報通信・制御分野を支える組み込み技術

Embedded Technology and Its Application to Communications and Control

甲斐谷	聖	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	主査
岩崎	郁夫	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	主査
鎮目	大	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	
寺内	強	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	
守田	暁行	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	

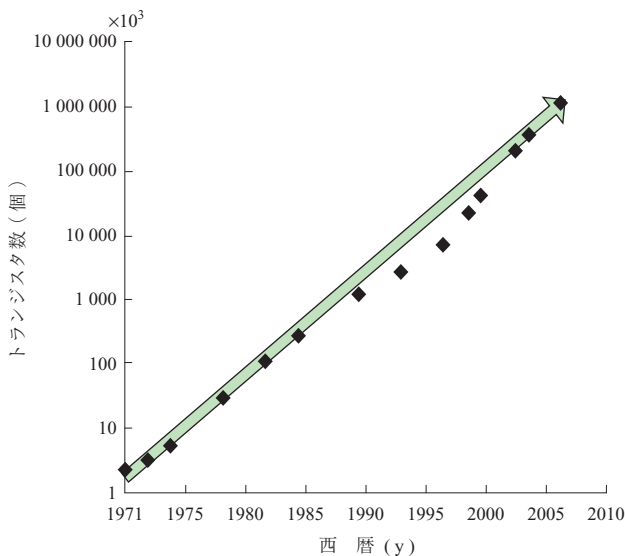
組み込み技術を活用し、市販品では対応できない独自の機能・性能をもつ制御基板・制御装置を開発している。組み込み技術は、電子回路技術・ソフトウェア技術・通信技術・高信頼化技術といった複数の技術をベースにしているが、半導体の高集積化を原動力としてこれらの技術が進歩するにつれ、組み込み技術を用いることによって大規模・高機能な制御装置を実現することが可能になった。本稿では、当社が保有する組み込み技術と、これを利用して実現した制御装置について紹介する。

IHI develops original controller boards and control systems that provide functionality that is not readily available using only off-the-shelf components. This development is based on embedded technology, which is a combination of electronic circuit, software, communication and high-reliability technologies. As these technologies become more advanced, driven by ever higher integration of semiconductor circuits in chips, embedded technology enables the construction of larger and more complex control systems. In this article, we describe the current status of embedded technology within IHI and its application to control systems.

1. 緒言

1948年にトランジスタが発明されて以来、現在までに半導体の小型・高集積化は、第1図⁽¹⁾に示すように大幅な進化を遂げている。

中央処理装置 (CPU: Central Processing Unit) は演算



第1図 IC 1 個当たりのトランジスタ集積数の推移⁽¹⁾
Fig. 1 Changes in the number of transistors in a single IC⁽¹⁾

処理能力が向上し、制御装置はより高度な処理が可能となっている。

また、ネットワークが普及し、人がインターネットによってつながる時代となって久しいが、ユビキタスネットワーク（あらゆる場所であらゆるモノがネットワークにつながるとする概念）で代表されるように、装置もネットワークによってつながる時代となってきている。

このような半導体や通信の技術の進歩に伴い、IHIグループでも、より大規模で高機能な各種制御装置が開発され、各種機器に適用されている。

本稿では、制御装置を実現するための中核的な技術である組み込み技術について説明し、適用例を紹介する。

2. IHIグループにおける制御装置の状況

IHIグループでは、お客様の製品製造を支える産業機械を提供している。産業機械は24時間稼働かつ長時間連続運転を求められる場合が多く、産業機械の制御装置に対しても高い信頼性が要求される。

IHIグループにおける製品の制御には、産業用途向けのPLC (Programmable Logic Controller) やプラント用途向けのDCS (Distributed Control System: 分散制御システム)

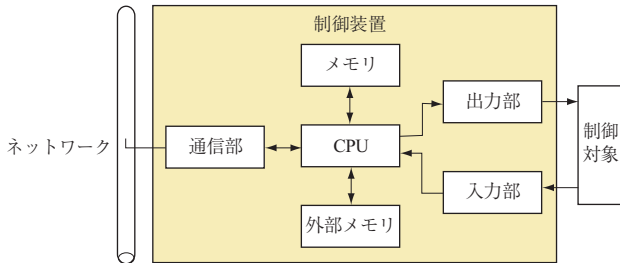
ム)が比較的多く使用されている。しかし、汎用機械のように生産台数の多い製品や、航空・宇宙など特殊な環境で使用される製品の制御には、電子回路基板を使用した専用制御装置が多く使用されている。専用制御装置は、特殊な動作環境での耐用性や特殊な性能が要求された場合でも要求仕様に合わせた最適設計が可能であり、さらに自社製作することで製品単価も抑えられる。また、長期的な製品供給およびメンテナンスの継続が可能で、設計上にかかわるブラックボックスを減らすことができるなど、市販の制御装置では得られない利点がある。

3. 組み込み技術

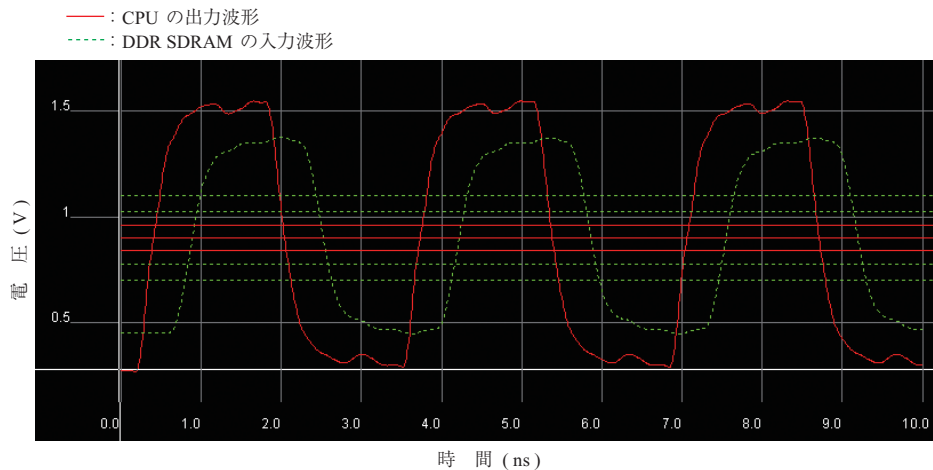
組み込み技術は、制御装置を実現するための中核となるハードウェア・ソフトウェアにまたがる技術で、エンベデッド技術 (Embedded Technology) と呼ばれることもある。組み込み技術の概要および当社の技術開発本部における組み込み技術の現状について述べる。

3.1 電子回路技術

制御装置は、第2図に示す機能要素によって構成され、電子回路によって構築する。



第2図 一般的な制御装置の構成
Fig. 2 Structure of a typical control unit



第3図 CPUが出力するDDR SDRAM制御信号の遅延および波形シミュレーション
Fig. 3 Signal wave simulation of DDR SDRAM control signal output from a CPU

3.1.1 CPU (Central Processing Unit)

CPUは①処理速度②内部メモリ容量③入出力機能④通信機能、などの違いによってさまざまな種類がある。技術開発本部で使用実績のあるCPUとしては、H8[®]マイコン、SH[®]マイコン、およびV850マイコンなどがある。

V850マイコンは車載向け、H8[®]およびSH[®]マイコンは主に一般産業向けに使用している。

最近では専用制御装置でも計算量の多い用途があるが、SH[®]マイコンでは動作クロック周波数600MHzという高速処理用CPUがあり、社内の研究試作用として使用実績がある。

3.1.2 メモリ

パーソナルコンピュータで主流の大容量メモリであるDDR SDRAM (Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory)が、組み込み向けCPUに搭載が可能となっている。

DDR SDRAMは、高速で読み込み・書き込みができるメモリであるため、基板を設計する場合は、伝送線路シミュレーションによって信号波形を評価する必要がある。第3図に、伝送線路シミュレーションによるDDR SDRAMの信号波形の例を示す。

3.1.1項で紹介したクロック周波数600MHzのSH[®]マイコンでは、600MHzのDDR SDRAMを使用しており、メモリへの1秒当たりのデータ読み込み・書き込み速度はおおよそ2.4GB/sである。

3.1.3 FPGA (Field Programmable Gate Array)

デジタル論理回路は、従来は標準ロジックデバイスを組み合わせて構築していたが、近年はプログラミング可能なデバイスであるFPGAを使用することが多くなっている。

FPGA は、AND、OR およびフリップフロップなどの論理素子が部品として多数内蔵されており、プログラミングすることによって論理素子を接続し必要な回路を構築する。

FPGA を利用することによって、大規模な論理回路を1チップにまとめることが可能であり、基板が小型化できる。また、プログラムは書き換え可能なので、バージョンアップや仕様変更への柔軟性をもたせることができる。

第4図にFPGAを使用したデジタル論理回路設計の概要を示す。近年のFPGAは大容量であるため、設計効率、設計品質を上げるためにシミュレーションによる事前の設計検証が不可欠である。

3.2 組み込みソフトウェア技術

3.2.1 リアルタイム OS (Operating System)

リアルタイム OS は、制御イベントの発生によって決められた時間内に処理を実行し完了することが求められ、イベント発生ごとに優先度の高い順に処理を実行する。

技術開発本部では、複数のリアルタイム OS の利用実績があり、製品ごとに特長があるため目的に応じて使い分けている。

リアルタイム OS である VxWorks[®] は、大規模で通信や GUI (Graphical User Interface) などの高い機能が必要なシステムに向いている。NORT i[®] は、必要とするメモリ容量が少ないため、小規模システムでも適用可能である。

また、製品ライセンス費が無料のため、比較の出荷台数の多い汎用機器などの製品向きである。

3.2.2 組み込みリアルタイム・ソフトウェア設計技術

組み込みソフトウェアは、高速、リアルタイム性といった性能のほかに、CPU 演算能力、メモリ容量などのハードウェアの制約も影響するため、パーソナルコンピュータ上で作動するソフトウェアに比べて開発の難易度が高い。また、汎用機器などの量産製品は市場に出回る数量が多いため、このソフトウェアにバグが混入した場合に多大な損害を引き起こすこととなるので、ソフトウェアの品質確保が重要である。

組み込みリアルタイム・ソフトウェアの設計では、リアルタイム性およびハードウェアの制約といった、機能として明示して要求されない事項をも把握し、要求仕様を満たすソフトウェアの構造をどのように設計するかが重要である。

また、信頼性を確保するための品質を作り込む手法、体制も重要である。組み込みソフトウェアは、ほとんどの部分を人間の手によって設計、製作するため、人為的ミスの混入の完全な防止は難しい。ミスの混入を最小限にするためには、ソフトウェアの開発プロセスを明確にして設計を進めることが重要である。

3.3 通信

代表的な通信方式について説明する。

3.3.1 RS232C, RS422, RS485 通信

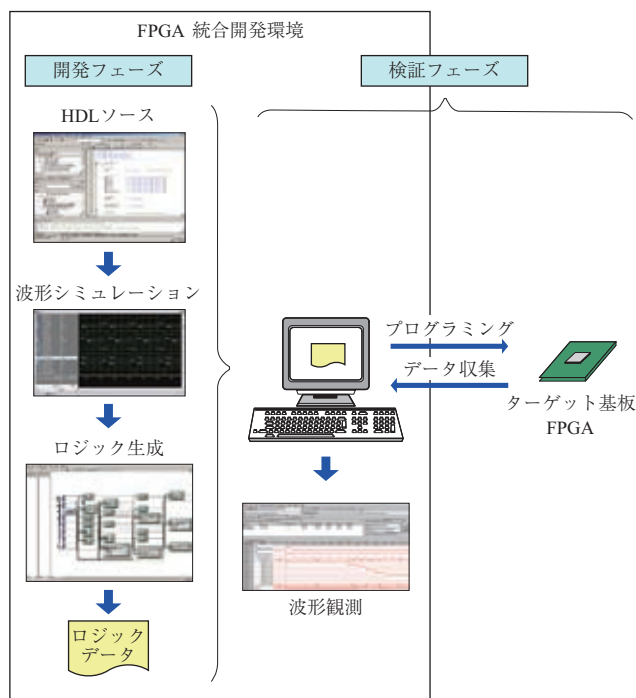
RS232C, RS422, RS485 通信は、規格制定から数十年使用されている通信インタフェースである。ハードウェアおよびソフトウェアのリソースをあまり必要としないため、安価、手軽なインタフェースとして現在でもほとんどの制御装置に搭載している。

3.3.2 Ethernet[®] 通信

Ethernet[®] 通信は、オフィスや家庭で広く使われており、ほかの通信方式と比べ高速な通信を低コストで実現できることが特長である。産業分野でも利用が進んでおり、リアルタイム性、耐環境性をもたせた産業用 Ethernet[®] と呼ばれる規格も登場している。技術開発本部では、もっとも広く普及しているツイスト線を利用する Ethernet[®] (100BASE-TX) を利用して、制御装置のネットワーク化に対応している。

3.3.3 CAN 通信

CAN 通信は、自動車に搭載された機器間の通信規格としてもっとも広く普及しており、ほかの分野でも利用が広がっている。CAN は、同一 LAN 上の全機器がマスタと



(注) HDL : Hardware Description Language

第4図 FPGA デジタル論理回路設計の概要
Fig. 4 Summary of the FPGA digital logic design

なって送信できること、高いエラー検知およびエラーリカバリ機能によって通信の確実性が高いことなどの特長をもっている。

技術開発本部では、車載機器への CAN 通信の組み込みを行っている。

3.4 高信頼性設計技術

3.4.1 自己診断回路

システムおよび制御装置に異常が発生した場合、その異常を制御装置が誤作動する前に検出して出力を正常に保つためには自己診断回路が必要となる。代表的な自己診断の方法として、① CPU の状態を監視するウォッチドッグタイマ ② 電源監視 ③ 温度・ファン作動状態監視 ④ 断線・短絡などの入出力信号診断 ⑤ 通信の異常監視 ⑥ メモリ診断 ⑦ プログラムの実行順序の監視、が挙げられる。具体的な方法の一例を 4 章で述べる。

3.4.2 フェールセーフ回路

自己診断によって制御装置が異常を検出した場合、フェールセーフ回路によってシステムの状態を安全側に移行させる。フェールセーフ回路は、異常時に確実に作動することが重要であるため、CPU などの他回路から影響を受けない回路構成とすることが必要である。

4. 組み込み技術の適用例

組み込み技術を利用して実現した制御装置の例として、技術開発本部と当社原動機セクターで共同開発したガスタービン発電プラント制御用のリモート入出力用基板を紹介する。

4.1 概要

ガスタービン発電プラントでは、制御装置と制御対象（ガスタービン）が離れて設置されているため、両者間を

データ通信によって接続し制御に必要な入出力信号を伝送するリモート入出力システムを構成している。

第 5 図にガスタービン発電プラント制御装置のシステム構成、第 6 図にリモート入出力システムを構成する電子回路基板のうち、R-BUS 基板と呼ぶ制御装置側の基板の概観を示す。R-BUS 基板は、ガスタービン側のリモート入出力基板（拠点側基板）との間で、プラント内のセンサ、アクチュエータなどのデータを伝送する。

4.2 特長

4.2.1 高速、大容量、リアルタイムなデータ通信への対応

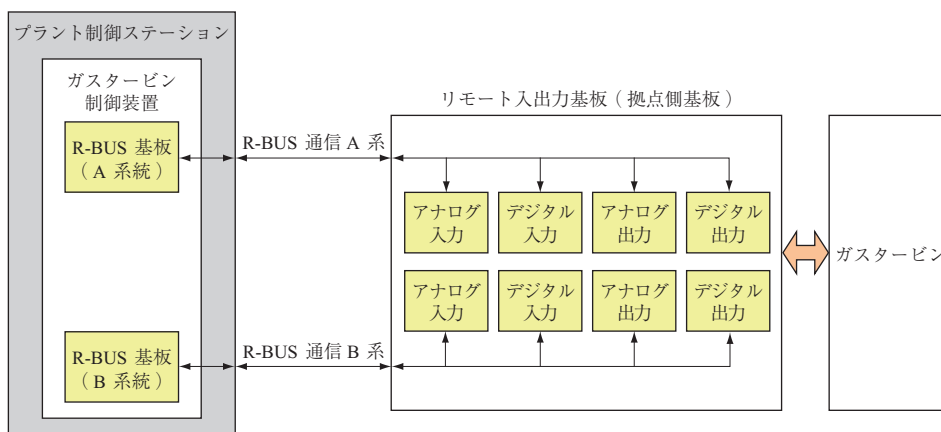
ガスタービン発電プラントでは、ミリ秒オーダーの周期で、多くのセンサやアクチュエータのデータを伝送する必要がある。標準的な通信仕様では要求仕様を満足できないため、当社の独自通信仕様（R-BUS 通信）を策定し自社開発した。

(1) FPGA の採用

当社の独自通信仕様のデータ処理には、CPU では処理速度が間に合わないため、高速で処理が可能な



第 6 図 R-BUS 基板の概観
Fig. 6 Outline of R-BUS electrical circuit board



第 5 図 ガスタービン発電プラント 制御装置のシステム構成例（二重系）
Fig. 5 Example system structure of a gas turbine generation plant control unit (redundant system)

FPGA を使用している。

FPGA を使用することによって、部品点数が減り基板面積を縮小できるほか、CPU 処理負荷を低減することができるため、装置全体の処理の高速化が可能である。

(2) リアルタイム OS の採用

リアルタイム OS を採用することによって、演算処理および大容量データ通信など、一定の制御周期で実行させる機能の搭載が容易である。

4.2.2 高信頼性への対応

リモート入出力システムでは、制御装置や通信の異常が発生した場合でもリモート入出力が停止せず制御を継続できるように、通信システムを多重化システム構成としている。

第 5 図において、R-BUS 基板と拠点側基板の間は R-BUS 通信 A 系および B 系の 2 系統接続されており、A 系に何らかの異常を検出した場合は、通信システムを B 系に切り替える。

異常検出は、自己診断機能によって常時、各機器の状態および通信状態の監視を行っている。

以下に、自己診断機能の概要を述べる。

(1) デジタル信号における入出力診断回路

拠点側基板には、センサやアクチュエータなどの入出力機器が接続されるが、入出力回路の健全性を診断する回路が組み込まれている。

短時間だけ入出力を変化させ、読み取り値が変化するかどうかを確認することで回路の健全性を診断する。

(2) アナログ信号における入出力診断回路

アナログ入力においては信号が規定範囲内であるか否かを判定、アナログ出力においては出力信号をループバック・モニタし、規定範囲内であるか否かを判定することによって健全性を診断する。

(3) ウォッチドッグタイマ回路

CPU の演算処理を規定時間内で実行していることを診断する回路で、規定時間を超えても CPU が演算処理を終了しない場合に異常と診断し、外部に異常信号を出力する。

(4) 通信異常監視機能

R-BUS 基板と拠点側基板間の通信状態を監視し、送信側と受信側で CRC (Cyclic Redundancy Code) コードの一致・不一致を判定し異常を検出する。また、通信エラー数、送受信回数などの送受信データの統計情報を収集する機能ももち、通信異常発生時の原因調査に役立てられるよう考慮している。

5. 今後の取組み

IHI グループ製品の競争力強化のため、組み込み技術を用いて高信頼、高度かつ複雑な制御の実現が必要である。また、製品のグローバル展開のために、海外規格への対応、オープン規格の取り込みが必須となっている。

高信頼度、高度かつ複雑な制御の実現は、組み込みソフトウェアによるところが大きい。このため、ソフトウェアの信頼性を向上するため、品質を作り込むための開発プロセスの整備、品質評価方法の検討を進めている。

海外規格対応については、第一段階として電気電子機器に対する機能安全規格の内容把握、要素技術の調査を進めている。

オープン規格対応については、IHI グループ製品と他社機器との接続を容易にするため、産業用 Ethernet[®] および PLC 向けローカルネットワークなどのオープンな通信規格の取り込みを図っている。

6. 結 言

組み込み技術の概要および適用例を紹介した。技術開発本部では長年にわたり、IHI グループにおける各種産業用制御基板や制御装置、センサ基板、モータドライブ基板などを開発してきた。

今後も日々進歩する組み込み技術の取り込みを図り、IHI グループ製品の付加価値を高められる制御装置の開発を行っていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 浅見直樹：創刊 1000 号記念 特別編集版 日経エレクトロニクス 日経 BP 社 2009 年 3 月 p.134