T-Engineって何？

早川 幹（はやかわ みき）
YRPユビキタス・ネットワーキング研究所

ユビキタス社会は、あらゆる生活空間にコンピュータが分散配置され、人々がコンピュータを意識することなくそれを制御・活用することができる社会です。これらたくさんのコンピュータは、自ら電源を持たないRFIDのような小さなコンピュータから、大量のデータを扱うサーバまで要求される性能や規模はさまざまです。

ユビキタス社会を実現するためには、これら多種多様なアプリケーションに最適なコンピュータシステムを開発する必要があり、ここには非常に多くの開発要素があります。特に近年、コンピュータシステムが多様化、大規模化することによって、ソフトウェアの開発工数がたいへん大きなものになりました。このソフトウェアの開発工数をいかに削減するかが課題になっています。

T-Engineフォーラムでは、ユビキタス社会を構成するコンピュータの開発効率を向上させるために、リアルタイムOSであるT-Kernelを標準化すると同時に、ハードウェアの仕様も規定することによって、その上に作られたデバイスドライバやミドルウェアの流通を可能にすることを目指しています。

ITRONとT-Kernel

組込みシステムのリアルタイムOSとして、ITRONが広く用いられています。ITRONは1984年に検討が開始されたTRON仕様の組込み向けリアルタイムOSで、これまで4世代にわたって改良が行われています。

ITRONは「弱い標準化」というコンセプトにより標準化が行われてきました。「弱い標準化」とは、API（Application Program Interface）などの必要最低限の仕様のみを規定し、具体的な実装方法は特に規定しない規格化方針です。

ITRONの標準化が開始された80年代には、組込みシステムに使われるCPUは8ビットが主流で、メモリ容量などのハードウェアリソースも現在よりはるかに貧弱なものでした。ITRONは、「弱い標準化」によって、OSの機能のうち、システムに必要な部分のみを実装するサブセット化を許可しています。これによりCPUパワーやメモリ容量などのリソース制約が厳しい組込みシステムでは、OSの必要な部分だけを選択して実装することでコストを抑制することが可能になりました。OSをそのシステム専用に最適化する余地を残した「弱い標準化」は、コスト制約の厳しい組込みシステムを開発するエンジニアに広く受け入れられました。

ソフトウェアの開発工数を削減する方法のひとつに、過去に開発したソフトウェアや、他人が開発したソフトウェアを再利用するという方法があります。組込みシステムの世界もITRON仕様というOSの標準化が行われたことによって、企業内などではソフトウェアの再利用が行われてきました。

しかし、ITRON仕様のOSは、「弱い標準化」によってソフトウェアのポータビリティが十分とは言えず、たとえば他社で開発された実装の異なるITRON仕様OS同士では互換性が維持できないという問題が生じました。

あるシステム向けに開発されたソフトウェアを変更なく他のシステムに適用できれば、ソフトウェアの開発効率は飛躍的に改善します。このソフトウェアを流通するしくみを実現するために、ITRONをベースにより「強い標準化」を行ったのがT-Kernel仕様のOSです。

T-Kernelは、カーネル部分のソースコードを一本化しました。カーネルのソースコードの大部分はC言語で記述されており、再コンパイルすることで異なるCPUに対応します。CPUが異なっても、カーネル部分のソースコードを完全に共通とすることで、仕様上の実装依存を排除しました。

CPUのアーキテクチャの違いにより書き換えなければならない部分については、ハードウェア依存部としてカーネル基本部と分離しました。新しいハードウェア向けに移植する場合には、ハードウェア依存部のみを用意するだけで移植することが可能です。

さらに、ITRON仕様から、プログラ

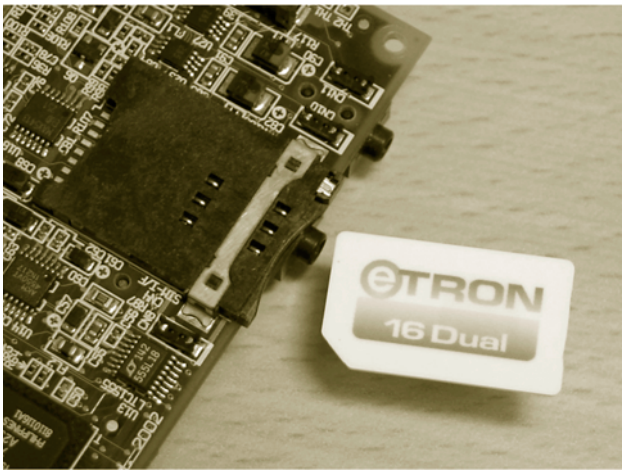


図1　eTRONチップの一例

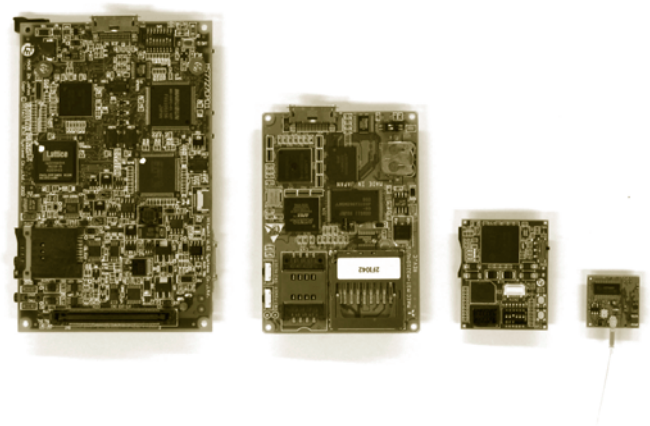


図2　T-Engineファミリ（左から標準T-Engine、μT-Engine、nT-Engine、pT-Engine）

ムのダイナミックロード、MMUを用いたメモリ管理などの拡張が行われ、より大規模なシステムに対応できるようになりました。

T-Kernelの「強い標準化」により、T-Kernel上で開発されたソフトウェアは、再コンパイルすることで異なるCPUを搭載したT-Engineに適用することができます。これにより、ミドルウェアの流通を可能にし、システムの開発工数を大きく削減できるのです。

T-Kernelの入手方法

T-KernelのソースコードはT-Engineフォーラムのウェブサイト（http://www.t-engine.org）から入手することが可能です。基本的にだれでも（T-Engineフォーラム会員でなくても）無償で組込み機器に組み込んで利用できますが、その取得の際T-Kernelのソースコードのライセンス契約であるT-Licenseに同意することが必要です。

組込みシステムに適用するという特性上、OSを特定のハードウェアにチューニングするという改造を行う必要があるかもしれません。T-Licenseでは、改造版のT-Kernelを機器に組み込んで使用することは許可していますが、この改造したソースコードをT-Engineフォーラムに許可なく配布することを禁じています。これにより、いろいろなハードウェアにチューニングされた改変版T-Kernelが流通して、ミドルウェアの互換性が保たれなくなることを防止しています。

T-Engineのハードウェア

T-Engineは、T-Kernelが動作するプラットフォームとなるハードウェアです。T-Engineフォーラムでは、ソフトウェアとハードウェアの両面からユビキタス社会を構成するコンピュータの標準化を目指しています。ソフトウェア面では、リアルタイムOSの「強い標準化」によってT-Kernelを標準化し、ハードウェア面では、標準プラットフォームとしてT-Engineハードウェアを標準化しています。

T-Engineの特徴のひとつは、オープンアーキテクチャ、オープンプラットフォームであるということです。OSのソースコードをはじめ、基板の回路図まで公開されており、組込みシステム開発を志す技術者がその動作を学ぶのに最適の環境です。

さらに、もうひとつの特徴は、セキュリティです。

ユビキタス社会では、ネットワークを介してコンピュータ同士が互いに連携し、人間の生活をサポートします。ここには常に改竄（かいざん）やなりすましなどの脅威が存在し、セキュアな認証通信によって情報をやり取りすることが必須となります。

すべてのT-Engineには、eTRONと呼ばれるセキュリティアーキテクチャのフレームワークが提供されています。eTRONの重要な要素のひとつがeTRONチップです（図1）。eTRONチップは、電子マネーや証明書などをは

じめとするデジタル化された価値情報を格納するために用いる専用のデバイスです。チップ自身が外部から改竄や複製ができない耐タンパ性を備えており、中の価値情報はeTP（Entity Transfer Protocol）と呼ばれる専用のプロトコルで安全に操作できます。すべてのT-Engineには、eTRONチップとのインタフェースが備えられており、今後ますます重要になる組込みシステムのセキュア通信機能をさまざまなアプリケーションに盛り込むことが可能です。

T-Engineのファミリ展開

T-Engineフォーラムでは、T-Engineのファミリとして、標準T-Engine、μT-Engine（マイクロ・ティー・エンジン）、nT-Engine（ナノ・ティー・エンジン）、pT-Engine（ピコ・ティー・エンジン）の4種類を規定しています（図2）。このうち、標準T-EngineとμT-Engineを開発プラットフォーム、nT-EngineとpT-Engineを実行プラットフォームと位置づけています。

開発プラットフォームとは、組込みシステムを開発するときのプロトタイプとして使用するコンピュータシステムです。表1に現在製品化されているT-Engine開発プラットフォーム製品の一覧を示します。SH、M32R、FRなどの国産のCPUコアをはじめとして、ARMやMIPSといった世界的にシェアの高いCPUコアを用いた製品が数多く

表1　現在発売中の標準T-Engine／μT-Engine一覧

ファミリ	製品名	CPU ベンダー	CPU 型番	CPU コア	クロック周波数	拡張バス
標準 T-Engine	SH7760	(株) ルネサステクノロジ	SH7760	SH-4	200MHz	ローカルバス
	SH7751R	(株) ルネサステクノロジ	SH7751R	SH-4	240MHz	ローカルバス /PCI
	SH7727	(株) ルネサステクノロジ	SH7727	SH3-DSP	96MHz	ローカルバス
	VR5500	NEC エレクトロニクス (株)	VR5500	MIPS IV	400MHz	ローカルバス /PCI
	TX4956	(株) 東芝	TX4956	MIPS	400MHz	ローカルバス /PCI
	ARM926-MB8	富士通 (株) ※	MB87Q1100	ARM926EJ-S ARM946E-S	200MHz	ローカルバス
	ARM922-LH7	シャープ (株) ※	LH7A400	ARM922T	200MHz	ローカルバス
	ARM920-MX1	Freescale, inc. ※	MC9328MX1	ARM920T	200MHz	ローカルバス
	ARM720-LH7	シャープ (株) ※	LH79520	ARM720T	77.4MHz	ローカルバス
	ARM720-S1C	セイコーエプソン (株) ※	S1C38000	ARM720T	72MHz	ローカルバス
μ T-Engine	ARM7-LH79532	シャープ (株) ※	LH79532	ARM7TDMI	50MHz	ローカルバス
	M32104	(株) ルネサステクノロジ	M32104	M32R	216MHz	ローカルバス
	VR4131	NEC エレクトロニクス (株)	VR4131	MIPS II	200MHz	ローカルバス /PCI

※横河ディジタルコンピュータ（株）がボードを開発しています。

製品化されています。これらはT-Engineフォーラムが規定するハードウェア仕様にのっとって設計されており、CPUの違いを特に意識することなく組込みシステムを開発することができます。

一方で、実行プラットフォームは、実際にユビキタス社会に配置されるコンピュータです。より小型で、ネットワークに接続されて互いに連携して人間社会をサポートします。

以下に、各T-Engineファミリの特徴を説明します。

●標準T-Engine

標準T-Engineは液晶やタッチパネルなどのユーザーインタフェースを備え、PDAや携帯電話などの情報端末、インターネット端末やセットトップボックスなどの情報家電や情報端末などをターゲットとした開発プラットフォームです。

● μT-Engine

μT-Engineは、標準T-Engineと比較して比較的軽いユーザーインタフェースを持ち、FA、計測、自動販売機等の組込み制御機器をターゲットとした開発プラットフォームです。液晶やタッチパネルなどのユーザーインタフェースなどはありませんが、その分基板サイズが小型化されています。

●nT-Engine

nT-Engineは、有線ネットワーク経由でセンサの情報を取得したり、照明など比較的簡単な制御を行う実行プラットフォームです。nT-Engine同士が互いに接続され、リアルタイムネットワークを構成します。

●pT-Engine

pT-Engineは、無線でネットワークに接続される超小型の実行プラットフォームです。処理能力は高くありませんが、低消費電力で、どこでも設置することができるユビキタス社会を構成するコンピュータの最小単位です。

nT-EngineとpT-Engineは現在T-Engineフォーラムで標準化が行われています。以下では、主に開発プラットフォームである標準T-EngineとμT-Engineについて解説します。

標準T-Engine、μT-Engineのハードウェア構成

開発プラットフォームである標準T-Engine、μT-Engineは、汎用のシリアルインタフェースやメモリカードインタフェースをあらかじめ備え、組込みシステムが容易に開発できるように配慮されています。さらに、これらのT-Engineのボード上のインタフェースに対し標準ドライバAPI仕様を規定することで、異なるCPUを搭載したT-Engineボードに差し替えてもソフトウェアのソースコードの改変を不要にしています。

表2　標準T-EngineとμT-Engineのスペック比較

	標準 T-Engine	μ T-Engine
CPU	32 ビット	32 ビット
MMU	必須	任意
RAM	必須 (容量は任意)	必須 (容量は任意)
eTRON カード I/F	SIM コネクタ× 1	SIM コネクタ× 1
LCD パネル I/F	必須	任意
タッチパネル I/F	必須	任意
リアルタイムクロック	必須	必須
カード I/F	PCMCIA Type II x1	コンパクトフラッシュ Type II × 1 MMC または SD × 1
USB Host I/F	USB1.1 準拠 × 1	任意
シリアルポート	1ch（115.2kbps 以上）	1ch（115.2kbps 以上）
スイッチ類	電源スイッチ リセットスイッチ NMI スイッチ	電源スイッチ リセットスイッチ NMI スイッチ 汎用 I/O × 2
音声入出力	ヘッドホン端子 × 1 イヤホンマイク × 1	任意
拡張バス I/F	T-Engine 規格 1slot	T-Engine 規格 1slot
電源コネクタ	EIAJ RC-5320A 準拠	EIAJ RC-5320A 準拠
ボードサイズ	75mm × 120mm	60mm × 85mm

標準T-Engineと μT-Engineの機能比較を表2に示します。

標準T-Engineは、CPUは32ビットで、MMU（Memory Management Unit：メモリ管理機能）が必須となっています。タッチパネル付き液晶画面やボタン、また音声の入出力などのユーザーインタフェースを持ちます。また、ハードウェアの拡張やプログラムを格納するフラッシュメモリ等との接続に、PCMCIAやUSBホスト機能など豊富な汎用インタフェースを備えています。高機能でありながら外形もたいへん小型ですので、バッテリーを付ければPDAのプロトタイプとしても使用できます。

一方、μT-Engineは、画面や音声などのユーザーインタフェースは必須ではありませんが、そのぶん小型です。CPUは32ビットと規定されていますが、MMUは必須ではありません。外部インタフェースには、標準T-Engineと比較してより小型な、コンパクトフラッシュインタフェースとMMCまたはSDカードスロットを搭載しています。メモリカードとのインタフェースが2系統以上用意されているのは、片方をプログラムを格納するストレージとして用いているときに、もう片方を周辺機器とのインタフェースの拡張に使用できるようにするためです。

標準T-Engineと μT-Engineは搭載するインタフェースや外形寸法に違いがありますが、同一アーキテクチャであり、ともにT-Kernelが動作します。

標準T-EngineおよびμT-Engineのボード構成例を図3、図4に、CPUボードの構成例を図5に示します。CPUボードにはCPUやメモリ、電源回路などシステムを動作させる基本機能がすべて搭載されており、単体で動作させることができます。CPUボードを中心に、LCDボードや拡張ボード、デバッグボードを組み合わせて機能を拡張することができます。μT-Engineは、LCDボードとのインタフェースは必須ではありません。拡張ボードの表裏に拡張コネクタのプラグとレセプタクルを搭載することで、複数枚スタックして使用することができます。

これらのボードは、T-Engineフォーラムにより外形寸法、外部インタフェースのコネクタ位置が規定されており、CPUが異なっても同一筐体が使用できます。

T-Engineの拡張コネクタ

T-Engineの拡張コネクタには、搭載

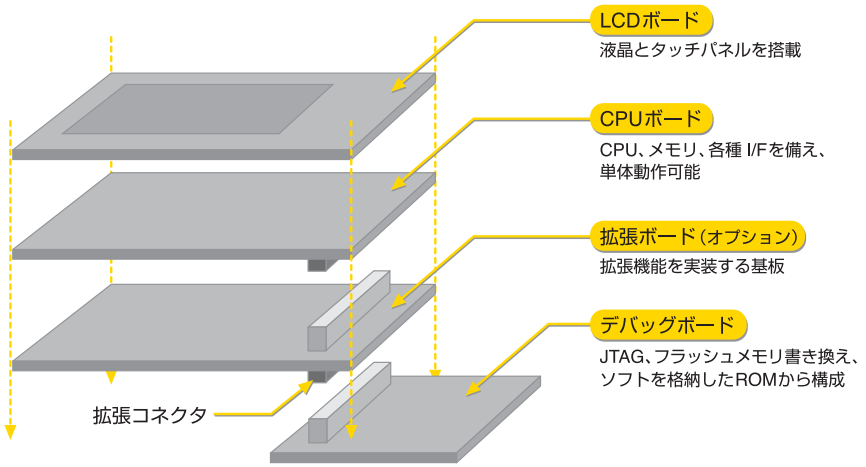


図3　標準T-Engineのシステム構成例

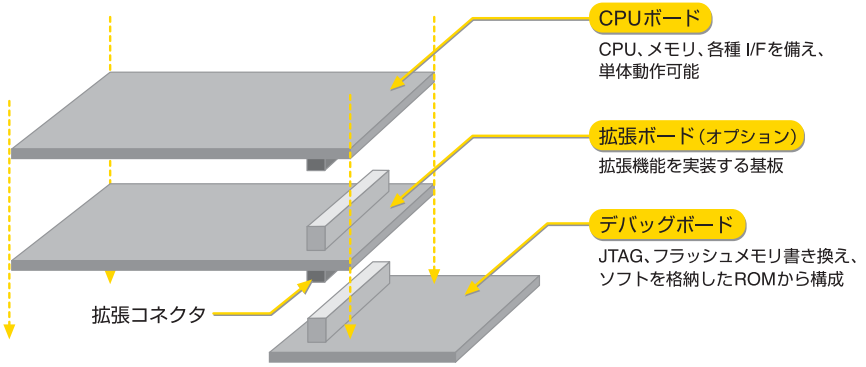
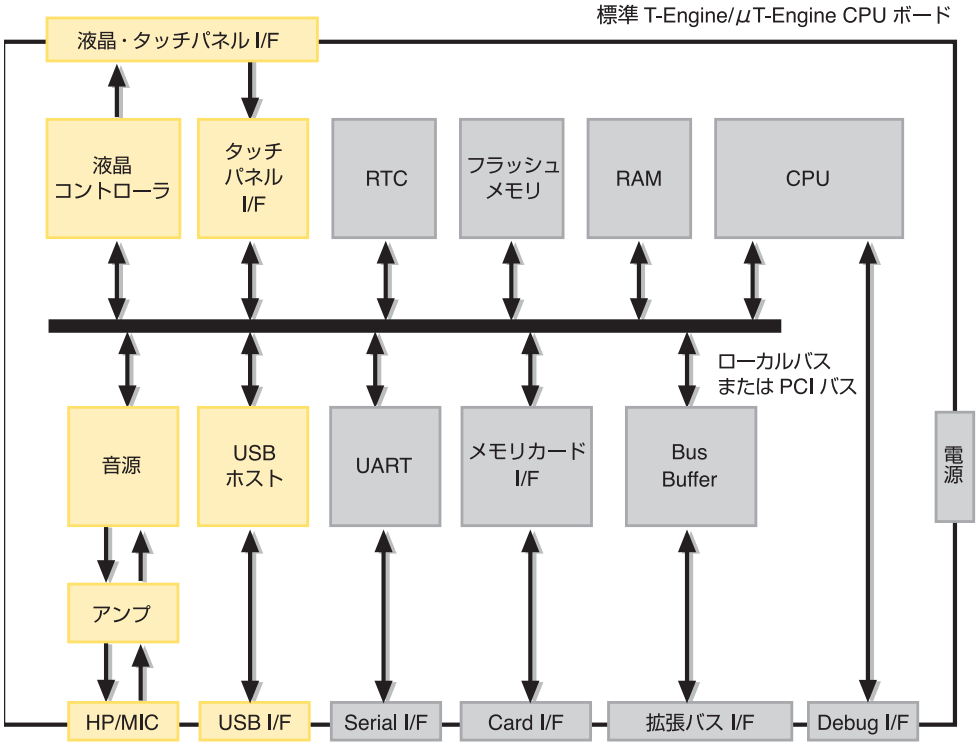


図4　μT-Engineのシステム構成例



※ ▭ はμT-Engine では
搭載が必須ではありません。

図5　標準T-Engine／μT-Engineの標準的なCPUボード構成の例

されたCPUのバスが出力されています。T-Engineの規格では、拡張コネクタの信号アサインは規定されません。CPUのバスは、そのメーカーや品種により特色があります。品種により最適な信号アサインすることで、そのCPUの性能をフルに発揮できるようにしています。1つのバス規格に規定してしまうと、異なるバスプロトコルを持った製品の性能を制限してしまうばかりか、将来新しいアーキテクチャのCPUが出現したときに対応できず規格が陳腐化してしまうからです。

異なるT-Engine向けに作られた拡張ボードを誤って挿入してT-Engineや拡張ボードを破損してしまうことがないように、拡張コネクタの両端には誤挿入防止用のキーが付いています。このキーは、拡張コネクタに出力されているバスの種類によって、T-Engineフォーラムにより割り当てられています。

図6に現在アサインされているT-Engineのキーイングを示します。片側のKEY-Aがバスタイプ、反対側のKEY-Bがメーカーコードを表しています。キーイング00はマスターキーです。たとえばバスの違いを意識せず使用できる電源供給ボードやFPGAボードなどには、どんなT-Engineにも接続できるマスターキーを使用します。

T-Engineの製品の中には、拡張コネクタにローカルバスとともにPCIバスが出力されているものもあります。PCIバスはCPUと周辺デバイスを基板上で接続するための標準規格です。PCIバスを備えるT-Engineの拡張コネクタのPCIバス部分の信号アサインは統一されており（バスタイプ04）、PCIバスを使用した拡張ボードはPCIバス

を備えたT-Engine製品で共用することができます。

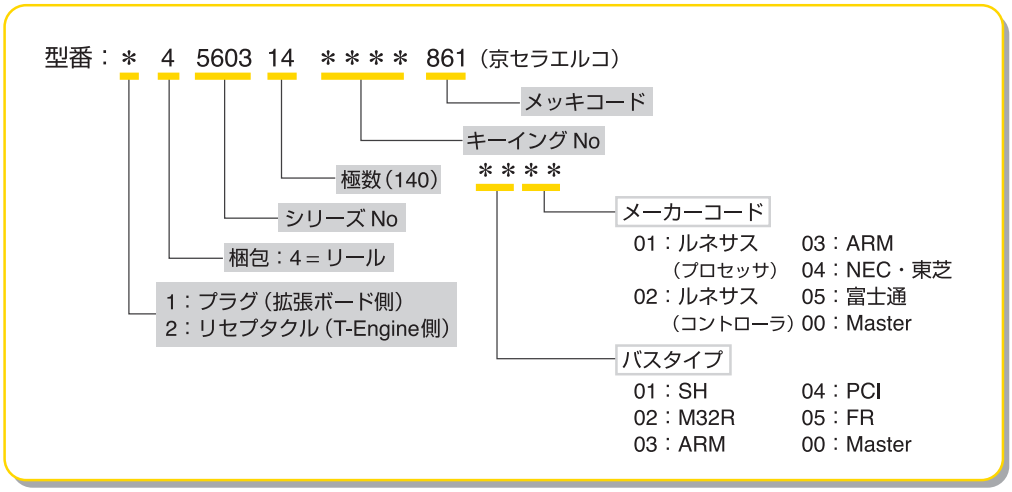
PCIバスにはPCやワークステーション向けに、ネットワークやグラフィックなど多種多様なデバイスが製品化されており、部品の選択肢がたいへん広いのが魅力です。

T-Engineによるハードウェア開発

T-Engineの拡張コネクタに接続する回路を開発するために、拡張ユニバーサルボードやFPGAボードが製品化されています。

●拡張ユニバーサルボード（ルネサステクノロジ）

拡張ユニバーサルボードは、手配線が難しいT-Engineの拡張コネクタの信号を、2.54mmピッチのスルホールに引き出し、ユーザーが簡単にハードウェアを拡張できるようにしたボードで



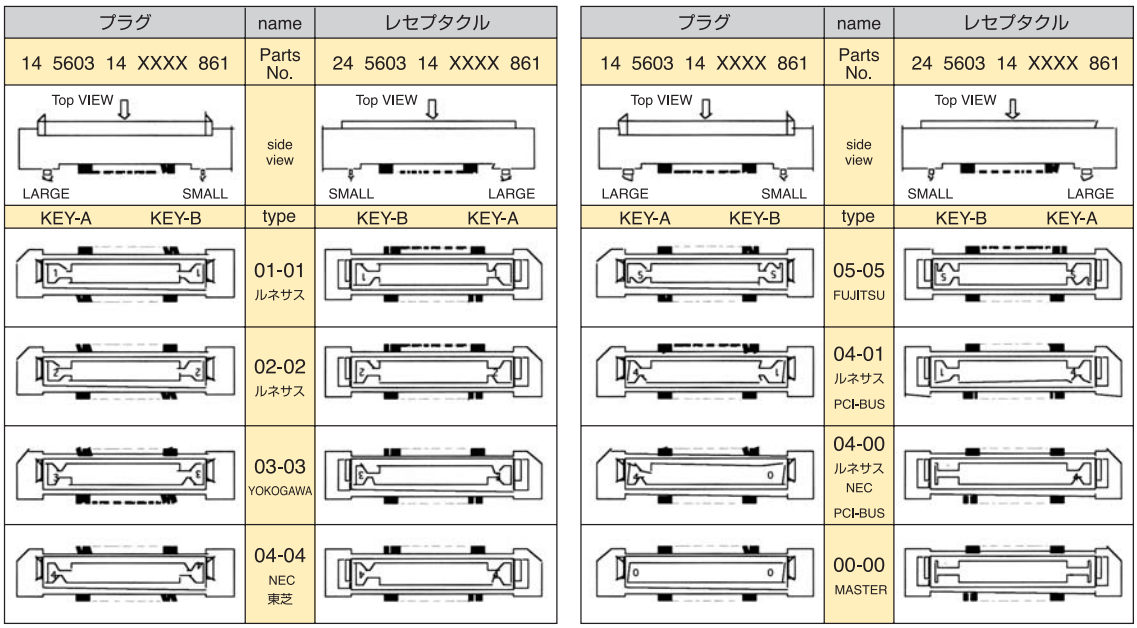


図6　拡張コネクタの誤挿入防止キー割り当て

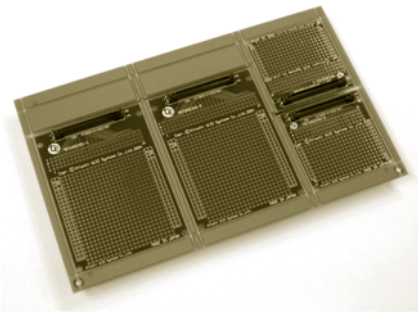


図7　拡張ユニバーサルボード

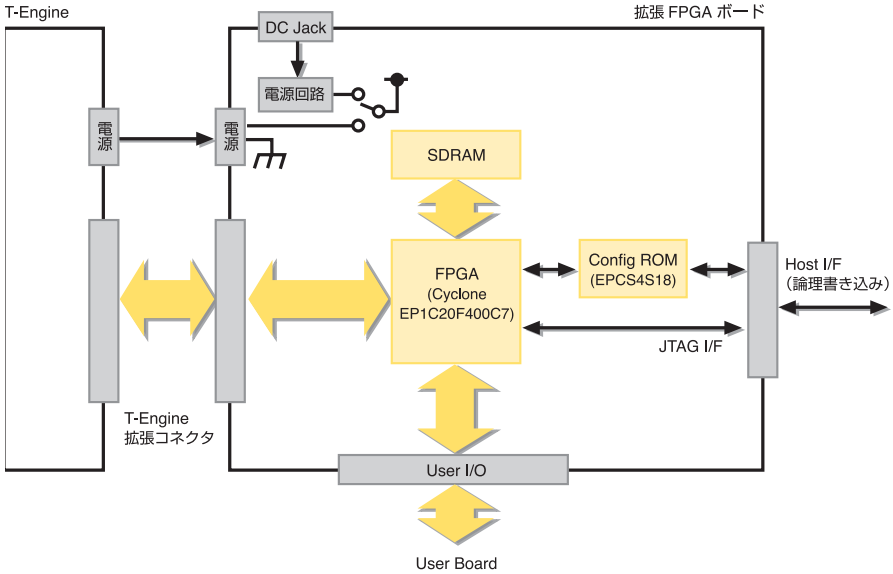


図8　拡張FPGAボードの構成

す（図7）。ボード上には2.54mmピッチのユニバーサルエリアが設けられており、任意の回路を手配線で接続することが可能です。センサや簡単なI/O類といった比較的小規模なユーザー回路を接続することに適しています。

拡張コネクタに出力されているバスの種類により、4種類のボードがセットで発売されています。SH7760、SH7751R、SH7727、SH7145、M32R、VR5500、VR4131、TX4956の各標準T-Engine、μT-Engineで使用できます。

●機能拡張FPGA開発ボード（アルティマ）

拡張ユニバーサルボードに収まらない大規模な回路を開発する場合は、FPGA開発ボードが便利です。FPGAとはField Programmable Gate Arrayの略で、内部回路をユーザーが外部からプログラム可能なLSIです。FPGAの中には、Logic Elementと呼ばれるフリップフロップを中心とした論理ブロックがあらかじめ多数作りこまれていて、これを外部からプログラムすることで任意の論理回路を作り込むことができます。

T-Engine向け機能拡張FPGA開発ボードの構成を図8に、T-Engineに接続した外観を図9に示します。

搭載されているFPGAはAltera社のCyclone EP1C20で、約20000個のLogic Elementを搭載しています。公称約25万ゲート規模の回路を構成することが可能であり、ASICの試作環境としても利用できます。また、基板上にSDRAMを搭載していますので、高速で大容量のメモリを使用するような大規模システムにも対応します。

このFPGAボードは、T-Engineの拡張コネクタの全端子をFPGAに接続し、バスプロトコルの違いをFPGAの内部論理で吸収することで、全T-Engineに対応します。誤挿入防止キーも、すべてのT-Engineで使用できるマスターキーになっています。

FPGAの内部論理は、再プログラミングすることですぐに変更が可能なので、設計変更から実機検証までの時間（TAT：Turn Around Time）を短縮することが可能になります。一般に、ASICなどのLSIの製造には数ヶ月単位の長い期間が必要ですが、FPGAを試作環境として使用することで、論理設計と並行して実機デバッグが可能になり、設計・検証効率が飛躍的に改善します。

T-Engineは、組込み向けリアルタイムOSであるT-Kernelが最初から動作する状態で出荷されるので、通常のハードウェア開発環境立ち上げに必要なOSのポーティングやデバッグ環境の構築のための工数が不要です。さらに、

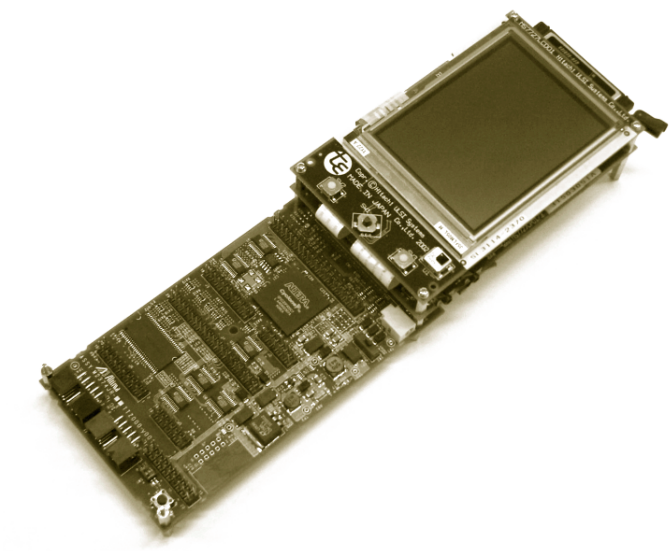


図9　拡張FPGAボードの外観

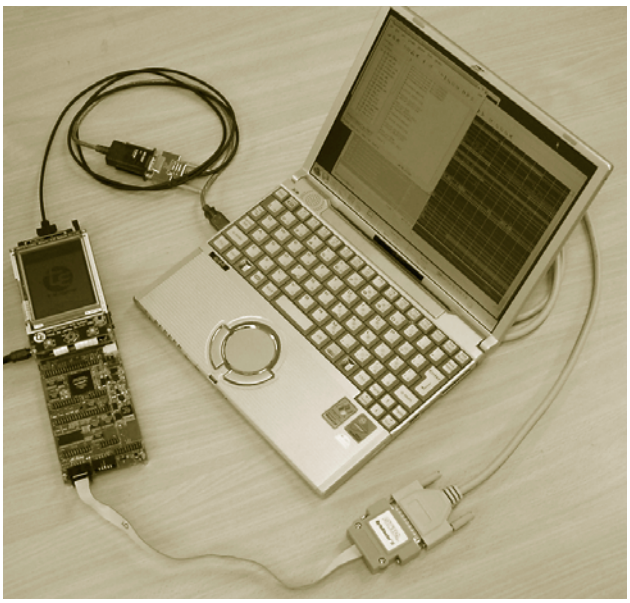


図10　ソフトウェアとハードウェアの開発をPC1台で！

拡張ユニバーサルボードやFPGAボードなどの短TATなハードウェア開発環境が整備されたことで、アプリケーションソフトウェアの開発と並行してハードウェアの開発が可能になりました(図10)。

T-Engineの応用製品とT-Engineアプライアンス

標準T-Engine／μT-Engineは、開発プラットフォームという位置づけでありながらたいへんコンパクトであり、最終製品に組み込んで使用することも可能です。

しかし、ある程度の量産規模になると、T-Engineのボード上で不必要な機能を削除したり、また独自の機能を追加して新規に専用の基板を開発することが必要になります。このT-Engineアーキテクチャを利用した応用製品をT-Engine Applianceと呼びます。

T-Engine Applianceは、T-Kernelが動作することが条件であり、搭載インタフェースや基板形状などのハードウェアについては特に規定していません。

まとめ

これまでに、主要なCPUを搭載した数々の特色あるT-Engine製品が登場し、要求性能や設計者の好みなどによって、自由に選択できるようになりました。

T-EngineはリアルタイムOSであるT-Kernelが最初から安定して動作する組込みシステム開発プラットフォームです。OSのポーティングやデバッグ環境の立ち上げを不要にしたばかりでなく、T-Kernelの「強い標準化」によってミドルウェアの流通を実現し、ソフトウェアの開発工数を大きく削減することを可能にしました。さらに、セキュリティフレームワークeTRONの標準サポートなど将来のユビキタス社会の実現を見据えた先進的なアーキテクチャも取り入れています。

また、拡張ユニバーサルボードやFPGAボードの製品化によって、ハードウェア開発やASICのプロトタイプ環境として使用する環境も整ってきました。これによりハードウェアとソフトウェアの協調開発が可能になり、T-Engineは組込みシステム開発プラットフォームの決定版といって差し支えない盛り上がりを見せています。

ぜひ組込みシステム開発に利用してみてはいかがでしょうか。