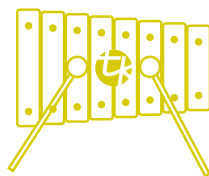
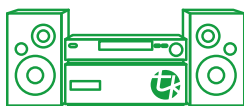


実践TRON 組込みプログラミング



T-KernelとTeaboardで
学ぶシステム構築の実際



坂村健 監修

パーソナルメディア株式会社 編著



パーソナルメディア

本書の著作権に関するご案内

パーソナルメディア株式会社
<http://www.personal-media.co.jp/>

本書は、以下の購入者にのみ使用・閲覧の権利が与えられています。

本書の書名：『実践TRON組込みプログラミング』

購入者：

メールアドレス：

購入日時：

購入時のIPアドレス：

本書は著作物であり、著作権法により保護されています。

私的使用のための複製や引用など著作権法上認められた場合を除き、本書の一部、または全部を、無断で転載・複製・配布・譲渡・放送・公衆送信・販売・貸与することはできません。

私的使用など著作権法上認められた範囲で複数のコンピュータ内に本書の複製を格納し使用・閲覧することができます。本書をネットワークを介して複数の人が使用・閲覧できる状態におくことはできません（インターネットや組織内ネットワークなどその規模は問いません）。

もしあなたが上記の購入者でなければ、著作権法違反の可能性があります。以下の発行元までメールでご連絡くださいますようお願いいたします。

連絡先

パーソナルメディア株式会社 出版部
pub@personal-media.co.jp

目次

監修のことば 8

はじめに 10

第1部 基礎編 13

第1章 T-Kernel とは 14

1.1 T-Kernel と T-Engine 15

1.2 T-Kernel と T-Kernel Extension 21

1.3 プロセスベースと T-Kernel ベース 25

第2章 Teaboard とその開発環境 30

2.1 Teaboard とは 31

2.2 Eclipse ベースの統合開発環境 36

第3章 開発環境のセットアップ 41

3.1 Teaboard とパソコンの USB 接続 42

3.2 Cygwin のインストール 46

3.3 Eclipse と Teaboard 開発環境のインストール 50

3.4	SD カードからの起動	58
3.5	「Hello, world」プロセスベース編	61
3.6	「Hello, world」T-Kernel ベース編	66

第 II 部 実践編 71

第 4 章 速習リアルタイム OS 72

4.1	プロセスベースの場合のタスク	73
4.2	T-Kernel ベースのタスク	81
4.3	割込みハンドラ	85
4.4	セマフォ	92

第 5 章 ネットワーク 96

5.1	ネットワークを使うには	97
5.2	IP アドレスの取得	102
5.3	ネットワークプログラミングの通信手順	105
5.4	TCP の例：ウェブサーバ	109
5.5	UDP の例：NTP クライアント	122

第 6 章 ファイル 129

- 6.1 ファイルを扱うには 130
- 6.2 ディレクトリの読み込み 134
- 6.3 FAT ファイルシステムのアクセス 140
- 6.4 ROM ディスクからのアプリケーションの自動起動 146

第 7 章 デバイスドライバの利用 150

- 7.1 デバイスドライバを呼び出すには 151
- 7.2 RS-232C ドライバの利用 155

第 8 章 デジタル I/O 160

- 8.1 LED の表示 161
- 8.2 GPIO の操作 166
- 8.3 チャタリングの除去 170

第 9 章 A/D、D/A 変換 177

- 9.1 D/A 変換 178
- 9.2 A/D 変換 180

第 10 章 デバイスドライバの作成 184

10.1 デバイスドライバの構造 185

10.2 温度センサードライバの作成 191

第 11 章 PMC 機器制御サーバ 204

11.1 PMC 機器制御サーバとは 205

11.2 スクリプトの作成 209

第 III 部 応用編 212

第 12 章 テルミンを入力デバイスにする 213

ご注意 213

12.1 制作内容 214

12.2 ハードウェアの製作 216

12.3 テルミンの周波数のカウント 219

12.4 値の正規化 225

12.5 デバイスドライバ化 231

12.6 ウェブサーバからの送信 238

12.7 画面表示 242

第 13 章 楽器の自動演奏 246

- 13.1 製作内容 247
- 13.2 ハードウェアの製作 249
- 13.3 楽器の制御 251
- 13.4 内蔵ブザーの制御 255
- 13.5 楽譜の自動演奏 261
- 13.6 デバイスドライバ化 267
- 13.7 ネットワーク経由での指示 271

第 14 章 モーターの制御 276

- 14.1 モーター制御の基礎 277
- 14.2 ハードウェアの製作 279
- 14.3 GPIO によるモーターの制御 281
- 14.4 PWM によるパルス生成 284
- 14.5 デバイスドライバ化 290
- 14.6 ネットワーク経由での指示 294

Teaboard について 299

索引 300

リンク集 305

ダウンロードのご案内／著作権表示／奥付 306

コラム

01	メモリ保護の利点	18
02	プロセスとタスクの違い	23
03	W型などの大文字のデータ型	74
04	T-Kernel のシステムコールと T-Kernel Extension のシステムコール	75
05	システムコールの戻り値	76
06	TCP のコネクションの確立	111
07	TCP では送受信が一对一に対応するとは限らない	115
08	汎用プロトコルの利点	120
09	リトルエンディアン	162
10	キャリブレーション	193
11	タスクでの周期処理	224
12	中央値 (median)	226
13	MML	262

えてきた。近年、あらゆるソフトウェアのオープン化が進む中、TRON プロジェクトのオープン性がさらに評価され、T-Kernel は、日本だけでなくアジアやヨーロッパを始め世界中で使われはじめている。

本書は、組み込みシステムの開発現場や教育現場を熟知するエンジニアの手で書かれた T-Kernel の入門書である。既刊書『T-Kernel プログラミング強化書』は、T-Kernel に関する広範囲かつ深い知識を取り扱ったが、本書は T-Engine 組み込みボードの「Teaboard」を教材に、実際に手を動かしながらリアルタイム OS と T-Kernel の基礎が学べるように工夫されている。

組み込みシステムを理解するための最良の方法は、自分自身で組み込みシステムのプログラミングを行い、その難しさや楽しさを体験することである。組み込みのプログラミングにおいても、C 言語や OS を使うという開発スタイルは、パソコンやサーバの場合と同じである。しかし、その処理対象については、ハードウェアを直接制御するデジタル入出力 (DIO) など、パソコンやサーバではあまり馴染みのないものも含まれる。本書では、ソレノイドによる木琴の制御など、身近な素材を用いて、そのノウハウを解説しており、プログラムによるハードウェアの制御を実践的に学べるようになっている。

さらに、チャタリングの除去や PWM (Pulse Width Modulation) を使ったモーター制御など、組み込みシステム開発の定番と言える話題についても、随所で実例を含めた解説が行われており、「組み込み」に必要な知識をひとつおろ網羅している。電子楽器テルミンのセンサー部分を入力デバイスとして利用する例も楽しい。組み込みシステムの本質がハードウェアとソフトウェアの協調動作であることを読者に実感させるという意味でも、本書に解説された例は的確でわかりやすいものとなっている。

本書では、トロンプロジェクトから生まれたリアルタイム OS 「T-Kernel」と、T-Kernel を搭載した組み込み制御用ボードである「Teaboard」を題材としているが、本書で得られた知識やノウハウは、他のボードやリアルタイム OS を利用する際にも役立つはずである。本書で学んだ技術者が、より多くの優れた組み込みシステムの開発に貢献し、便利で楽しく快適な人間生活の営みに多少なりともプラスになれば、これに勝る喜びはない。一人でも多くの組み込み技術者に本書をご活用いただけることを願っている。

2008 年 12 月

TRON プロジェクトリーダー
T-Engine フォーラム会長

坂村 健

はじめに

■ 本書のねらい

本書は組み込みリアルタイム OS の ^{ティーカーネル}T-Kernel と組み込み用ボード ^{ティードボード}Teaboard を題材として、プログラムのソースコードやハードウェア製作事例を満載した、組み込みシステム開発の実践的な解説書です。

T-Kernel は、長年の実績とシェアを持ちリアルタイム性能でも定評のある ^{アイترون}ITRON をベースに、ミドルウェアの流通促進などの最新機能を加えた、オープンな組み込み用の OS およびプラットフォームです。組み込み業界最大の団体ともいえる ^{ティエンジン}T-Engine フォーラム (<http://www.t-engine.org/>) によって標準化されています。

T-Kernel の使われている製品や開発用ボードは多数出ています。本書では Teaboard (P.299 参照) という低価格で多機能なボードを具体例として取り上げていますが、T-Kernel では「強い標準化」が行われていますので、ハードウェアに直接関係する部分を除けば、T-Kernel を搭載した別のハードウェア上でもほとんど同じソースプログラムと同じ操作方法でご利用いただけるはずですよ。

近年では「ものづくり」と「IT」が注目度の高いキーワードとなっており、この両方にまたがる組み込み分野の解説書も数多く増えてきました。しかしながら、実際に動くソースコードを載せた書籍はまだ少ないようです。組み込みシステムの開発には、直接人間の目に触れるアプリケーションから、ハードウェアを制御するデバイスドライバまで、多様な知識と経験が必要になります。そこで本書ではこういった幅広い分野に渡って、文章や図による概念の説明だけでなく、具体的に動くプログラムのソースコードを多数掲載しました。Teaboard を使って実際にプログラムを動かす、組み込みプログラミングの世界を体験していただきたいと思います。

■ 本書の構成

本書は次の 3 部構成になっています。

第 I 部は基礎編として、T-Kernel や Teaboard の機能の概要を紹介したあと、Eclipse ベースの開発環境のインストール、サンプルプログラムの作成、実行手順を説明します。ここまで読んでいただくことにより、まずは T-Kernel や Teaboard を使い始めていただくことができます。

第 II 部では実践編として、まずタスクや割り込みといったリアルタイム処理の基本をおさえてから、ウェブサーバへの機能追加といった形による実践的なアプリケーション開発を題材に、ネットワークやファイル、デバイスドライバの使い方などを説明します。またデジタル I/O などのハードウェア操作と、その機能をデバイスドライバとしてモジュール化する方法についても取り上げます。これらの説明により、アプリケーション開発とデバイスドライバ開発の双方に習熟す

ることができます。さらに機器制御サーバを使って簡単なスクリプトで組み込み機器のネットワーク制御を行う方法も紹介します。

第 III 部では応用編として、Teaboard に外部のハードウェアを接続して制御する典型的な例を 3 つ取り上げ、簡単なハードウェアの製作から、デバイスドライバ、アプリケーション、ネットワークを通じてウェブブラウザと連携するシステムを扱います。実際の組み込み機器の開発の参考例として活用していただければと思います。

■ 本書の読み方

本書は、組み込みシステムの初心者の方から、開発現場の第一線で活躍されているエンジニアの方まで、幅広い読者を対象としています。

● 教育、研修、実習用の組み込みシステム入門テキストとして

T-Kernel を使った組み込みシステムの入門テキストとして使用する場合は、第 I 部（1～3 章）と第 II 部の 4 章までを順に読み進めて、リアルタイム OS の基本的な概念を身につけてください。この中には開発環境のインストールや Teaboard 上でのプログラム実行の手順も含まれています。この説明の流れに沿って、実際に手を動かしながら動作を確認してください。その後は、5 章以降の実践的、応用的な話題から、興味のある部分を適宜選択して読み進めてください。

● 組み込みシステム開発の第一線で活躍中のエンジニアの方に

T-Kernel に関してすでにひととおりの知識や使用経験のある方は、必ずしも本書を最初から読む必要はありません。本書の第 II 部、第 III 部から、必要に応じて個別の話題を参照していただくのが効率的でしょう。

とはいえ、一般的なリアルタイム OS や ITRON には含まれず、T-Kernel において新たに加わった重要な概念も存在します。そこで少なくとも冒頭の 1 章にはひととおり目を通していただき、T-Kernel の基礎知識や全体像をご確認いただくことをお勧めします。

■ 参考書

本書は単独で読めるように配慮してありますが、さらにご興味がある場合には、本書と合わせて下記の参考書をお勧めします。

● 『T-Kernel 組み込みプログラミング強化書』

坂村健監修、パーソナルメディア編著、パーソナルメディア発行、ISBN978-4-89362-246-4

T-Kernel による組み込みプログラミングの総合的な解説書です。本書よりも広い範囲を扱っており、待ちに入る非同期のデバイスドライバなど高度な内容まで含めて、具体的に動くプログラムのソースコードを掲載しています。また豊富な練習問題が掲載されているため、自習や試験対策にも役立ちます。

- 『T-Kernel 標準ハンドブック 改訂新版』

坂村健監修、T-Engine フォーラム編著、パーソナルメディア発行、ISBN978-4-89362-229-7

T-Kernel の全 API の仕様を網羅した「原典」です。プログラミング中など、T-Kernel の API の仕様を確認したい場合に、手元に置いてご利用ください。

■ プログラムのダウンロード

本書に掲載したプログラムは、当社のウェブサイトから実際にダウンロードして Teaboard 上で実行することができます。ダウンロード方法については本書の奥付ページをご覧ください。



Teaboard のねらいや特長、ハードウェアやソフトウェアの構成を紹介します。

■ T-Kernel 搭載ボード「Teaboard」

本書では T-Kernel 搭載ボードとして ^{デューボード}Teaboard を例にとり、さまざまな組み込みプログラミングを実際に行っていくことにします。

Teaboard は多機能で低価格な T-Kernel 搭載ボードの一つです。CPU チップに内蔵された周辺機能をできるだけ活用し、部品点数を減らしてハードウェアのコストダウンをはかっています。T-Kernel の載った開発環境つきボードとしては、現在最も低価格な製品の一つです。一方、付属するソフトウェアや開発環境は T-Engine 開発キットと同じ構成になっています。

本書執筆時点での最新製品は Teaboard2/ARM920-MX1 で、環境に配慮した RoHS 対応製品となっています (P.299 参照)。最新情報については <http://www.t-engine4u.com/> をご参照ください。

■ Teaboard の利用例

(例 1) 実際の動作を試せる組み込み開発の教材として

1976 年に発売された 8 ビットマイコンボード「TK-80」は、マイコンの基礎を修得するトレーニングキットとして多くの技術者を育てました。Teaboard はいわばその現代版といえます。現在では 1976 年当時と比べてハードウェアの機能や性能が飛躍的に進歩しました。またソフトウェア面でも、当時は「組み込み OS」という考え方自体がほとんどありませんでしたが、その後 ITRON などのリアルタイム OS が普及し、その実績をベースに改良を積み重ね T-Kernel へと発展しています。Teaboard は 32 ビット CPU 上で T-Kernel を使っているいろいろ動かして遊んでみるには最適な環境となっています。

Teaboard の入出力としては、RS-232C (シリアル) が 2 ポート、SD カードが使えるほか、LAN でネットワークにも接続できます。またデジタル入出力 (GPIO) や A/D、D/A 変換を搭載しており、外付け回路を製作すれば、各種のセンサーに接続したり、モーターやソレノイド等の制御をさせることもできます。

単なるマイコンボードであれば、Teaboard より安いものも含めて各種市販されています。しかし、T-Kernel を用いてリアルタイムにハードウェアを制御でき、開発環境やドライバ、TCP/IP 等もすべて付属しているところが Teaboard の強みです。

(例 2) 実用的なシステムに組み込んで使う

Teaboard を実用的なシステムに組み込んで、低価格な実行用ボードとして使うこともできます。

たとえば IC カードで扉の鍵を開ける電気錠システムを考えてみましょう (図 2.1)。RS-232C で接続するタイプの IC カードリーダーであれば、そのまま Teaboard に接続できます。電気錠への出力や扉の状態の入力には、Teaboard のデジタル入出力 (GPIO) を用います。必要なら LAN を通じて他のマシンへのログ出力を行うこともできます。また、SD カード上に有効なカード ID のデータを格納しておけば、新しいカードの追加や、カード紛失時の無効化などにも柔軟に対応できます。

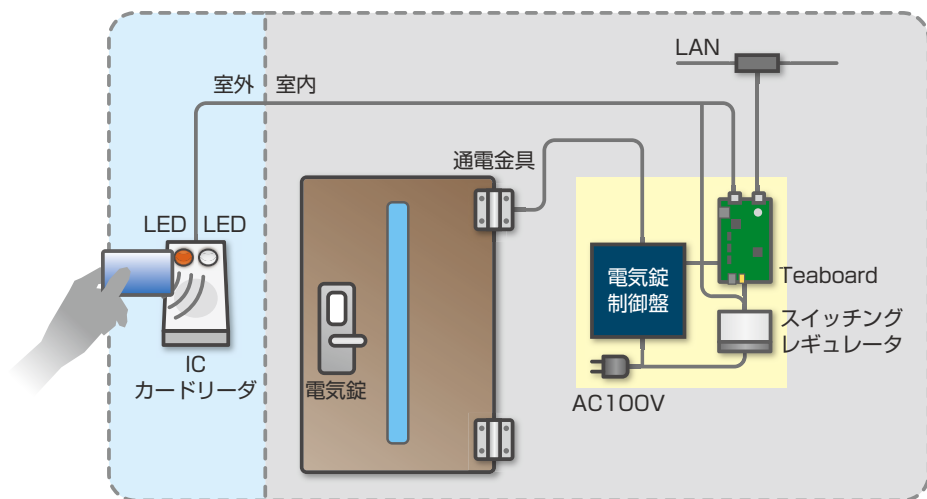
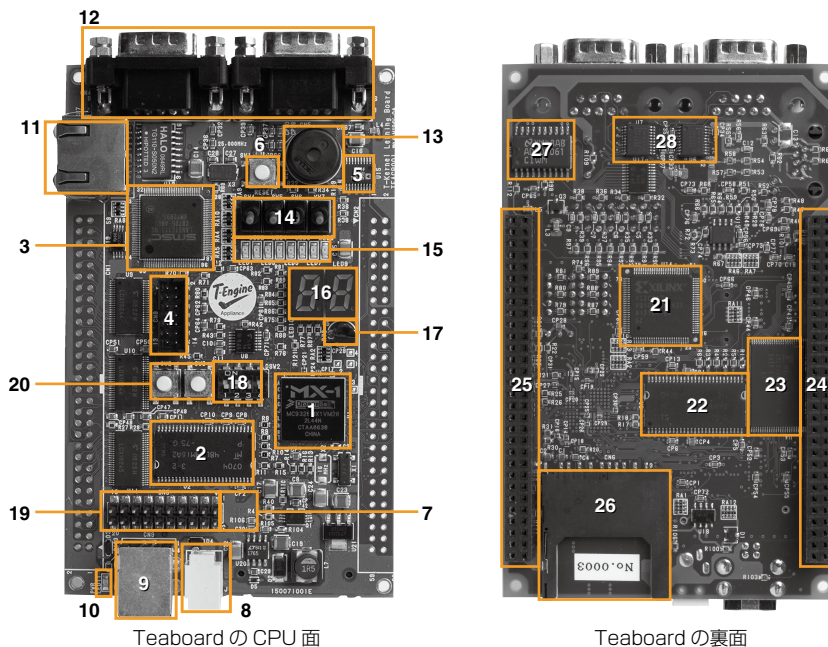


図 2.1 Teaboard を組み込んだ IC カード式電気錠システム

■ Teaboard のハードウェア

Teaboard では、サイズ 120mm × 75mm のコンパクトなボード上に、豊富な入出力機能を実装しています (図 2.2)。



Teaboard の CPU 面

Teaboard の裏面

- | | | |
|--------------------|-----------------|----------------------------|
| 1 CPU : MC9328MX1 | 11 ネットワークコネクタ | 21 CPLD |
| 2 SDRAM (裏面にもあります) | 12 RS-232C コネクタ | 22 SDRAM (CPU 面にもあります) |
| 3 LAN コントローラ | 13 ブザー | 23 Flash ROM |
| 4 CPLD 書き込みコネクタ | 14 トグルスイッチ | 24 拡張バスコネクタ取付端子 (コネクタは未実装) |
| 5 D/A コンバータ | 15 チップ LED | 25 I/O コネクタ取付端子 (コネクタは未実装) |
| 6 リセットスイッチ | 16 7セグメント LED | 26 SD カードスロット |
| 7 CPU モードスイッチ | 17 温度センサ | 27 A/D コンバータ |
| 8 電源コネクタ | 18 ディップスイッチ | 28 RS-232C レベルコンバータ |
| 9 USB Type-B コネクタ | 19 JTAG コネクタ | |
| 10 電源 LED | 20 プッシュスイッチ | |

図 2.2 Teaboard の表面 (CPU 面) と裏面

Teaboard のハードウェア構成は表 2.1 のとおりです。

表 2.1 Teaboard のハードウェア仕様

CPU	Freescale MC9328MX1 (i.MX、ARM920T コア、最大 200MHz)
フラッシュ ROM	2MB
RAM	16MB
入出力 I/F	USB (Function)、RS-232C (シリアル) × 2、LAN (10/100Base-T)、SD カードスロット、拡張バス I/F、JTAG-ICE I/F
汎用スイッチ	プッシュスイッチ 2bit、トグルスイッチ 4bit、ディップスイッチ 4bit
LED	LED 8bit、7セグメント LED 2桁
I/O	D/A、A/D コンバータ、デジタル IO (GPIO、PWM)
その他の機能	圧電ブザー、温度センサー
電源	USB バスパワー (または AC アダプタ)
寸法	120mm × 75mm (突起物を除く)

Teaboard のハードウェアの特長は、次のとおりです。

- CPU チップは ARM 系 32bit CPU の「MC9328MX1」(DragonBall) です。仮想記憶をサポートするのに必要な MMU のほか、さまざまな周辺機能が内蔵されています。
- 開発用のパソコンと USB 経由で接続し、高速にファイル転送やコンソール入出力ができます。
- USB はボードへの電源供給も兼ねています。このため電源アダプタは不要です。
- SD カード上のファイルを読み書きできます。
- LAN ポートからネットワークに接続できます。
- GPIO (デジタル入出力ポート) や A/D、D/A 変換を介して外部機器と接続できます。⁶⁾
- 2ポートのシリアル (RS-232C) 入出力があります。
- 7セグメント LED や押しボタンスイッチなどの入出力も備えています。

■ Teaboard のソフトウェア

Teaboard のソフトウェア構成としては、ボード上で動作する T-Kernel 等のソフトウェアと、パソコン上で動作する開発環境に大きく分かれます。主な構成を表 2.2 に示します。

Teaboard のソフトウェアの特長は、次のとおりです。

- Teaboard 上のソフトウェアは、OS からドライバやミドルウェア、さらに開発用のツール類まで、すべてひとつとおり揃っています。
- 開発環境としては、Eclipse ベースの統合開発環境を Windows パソコン上で利用できます。
- Teaboard のこれらのソフトウェア構成は、各種 T-Engine 開発キットの構成と基本的に同じです。Teaboard での開発の経験やノウハウはもちろん、作成したソースプログラムの多くの部分についても、そのまま他の T-Engine 開発キット等に活かせます。

6) I/O コネクタは標準では実装されていませんが、一般的な 2.54mm ピッチ 60 ピンのコネクタを取り付けることができます。

表 2.2 Teaboard のソフトウェア構成

ターゲット (Teaboard) 側ソフトウェア	
T-Monitor	PMC T-Monitor
T-Kernel	PMC T-Kernel (MMU 対応版)
T-Kernel Extension	プロセス管理、ファイル管理など
デバイスドライバ	SD カード、RS-232C、LAN など
ミドルウェア	TCP/IP プロトコルスタック
CLI	コマンドラインインタプリタ (ファイル操作、バッチ処理など)
ツール類	SD カードの区画作成、フォーマットなど
ホスト (PC) 側開発環境	
統合開発環境	Eclipse for PMC T-Kernel
コンパイラ	GNU C/C++ コンパイラ (T-Kernel 対応済み)
デバッガ	GDB (ソースレベルデバッガ)
ライブラリ	ANSI C ライブラリ、T-Kernel 関連ライブラリなど
付属ドキュメント	
マニュアル	取扱説明書、ハードウェア仕様書、開発環境説明書、ライブラリ説明書、 ドライバ説明書など
教材	各種サンプルプログラム、チュートリアル

本 PDF は『実践 TRON 組込みプログラミング』のお試し版です。

本書掲載のプログラムコードがダウンロードできません。
詳しくは正式版をご覧ください。

本書掲載のハードウェアおよびソフトウェアの製作および実行は、本書使用者の責任において行うものとし、製作および実行により発生し
たいかなる直接的・間接的被害についてもパーソナルメディア株式会社および著作権者、製品販売元はその責任を負いません。

TRON は “The Real-time Operating System Nucleus” の略称です。

BTRON は “Business TRON” の略称です。

ITRON は “Industrial TRON” の略称です。

本書中の TRON、BTRON、ITRON、T-Engine、 μ T-Engine、T-Monitor、T-Kernel、T-Kernel Extension は、コンピュータの仕様
に対する名称であり、特定の商品を示すものではありません。

超漢字はパーソナルメディア株式会社の商標です。

強化書はパーソナルメディア株式会社の登録商標です。

その他のハードウェア名、ソフトウェア名などは一般に各メーカーの商標、登録商標です。

Microsoft Corporation のガイドラインに従って画面写真を使用しています。

実践 TRON 組込みプログラミング (お試し版)

T-Kernel と Teaboard で学ぶシステム構築の実際

2008 年 12 月 20 日 初版 1 刷発行 (書籍版)

2011 年 11 月 21 日 PDF 版 発行

監 修 坂村健

編 著 パーソナルメディア株式会社

発行所 パーソナルメディア株式会社

〒141-0031 東京都品川区西五反田 1-29-1 コイズミビル

TEL : 03-5759-8303

FAX : 03-5759-8306

E-mail : pub@personal-media.co.jp

<http://www.personal-media.co.jp/>

© 2008 Personal Media Corporation

PMBK-254-PDF-00-01-Sample

