

## デジタル制御電源の現状とその将来像

野崎幸弘（新電元工業株式会社）

曾禰元隆（DSP 応用技術研究所） 竹田史章（高知工科大学）

### Current State and Future Image of the Digital Control Power Supply

キーワード：デジタル制御，DSP，スイッチング電源，DC-DC コンバータ

#### 1. はじめに

情報通信機器市場における各種電力変換装置内の電源は、負荷に対して最適な電力供給がなされるよう分散化が進んでいる。そして、これらの電源は小型高効率化の市場要求に適合するよう、そのほとんどがスイッチング制御で動作している[1][2]。従来のスイッチング電源、特にDC-DCコンバータは、その制御部をアナログ回路で実現する方法が主流であったが、通信やシーケンス等の機能高度化、小型化に伴う部品点数削減の必要性、高密度実装化による装置内温度上昇に対する免疫性、開発期間の短縮、等様々な要求の高まりから、これらの課題を解決できる可能性を持つデジタル制御の適用が検討されている[3]-[5]。

DC-DCコンバータ以外の電源、すなわち充電装置、インバータ、三相PFC、UPS、系統連携インバータ等は制御の複雑さからデジタル制御が適用されてきたようである[6]。これらの電源は概ね制御周期が長く、形状も比較的大きいことから、制御ICのコストとサイズの問題を吸収可能なことが普及の一助だったと言える。これに対してDC-DCコンバータは、スイッチング周波数が高く、形状もシンプルであり、さらに変換効率やコストの要求も厳しいことからデジタル制御ICの使用は実用的ではなかった。しかし、デジタル制御ICの有力候補であるDSPの価格が下がりサイズも小さくなったことや、コア周辺機能が充実化することで、デジタル制御DC-DCコンバータの商品化は現実的な事案になりつつある[7]-[9]。

電源をデジタル制御で動作させるには制御演算を行うDSPコアの周辺にADコンバータとPWMを備えることが必要である。最近のDSPはワンチップ構造で高分解能のADコンバータおよびPWMを搭載して全体の小型化と低コスト化に寄与しており、開発者にとっての魅力度は大きい。DSPを製造する半導体メーカは積極的に電源開発者に対してソリューションとプラットフォーム提案を行い、自社DSPをアピールする目的のイベントを積極的に開催している（例えば[10][11]）。

国内の電源メーカは限定的なカスタム品のレベルでデジタル制御電源を開発販売しているが（例えば[12]-[14]）、汎用すなわちカタログ品として商品化した例は現在までほとんど無いようである。他方国外では、数百WクラスのPOL（Point of Load）のような小容量、もしくは数kWクラスの中容量においてデジタル制御化された商品が発表、発売されている。制御ICであるがPOLについて調査した結果、ここまではプログラム実装型ではなくハードワイヤータイプのDSPを用いている例しか存在しない。ハードワイヤーDSPは、機能は限定されるがサイズおよびコスト面においてメリットがあるため数社のICメーカが販売しており、さらに電源システムとして企画商品化しているメーカもある。また中容量のデジタル制御電源についてもハードワイヤーDSPを使用する機種が多いと思われる。

プログラム実装型のDSPは主として米国の半導体メーカが製造供給している。現在、DSPを使用目的で分類すると、画像処理、音声処理、制御計測用に大きく分けられると考えられる。電源業界が使用するはその中の制御計測用であり、デジタル制御の演算および数値処理は全てプログラム動作である。このプログラム開発に際しては、記述およびDSPに最適な構造を整えることが電源技術者にとっては実は困難な課題であり、製品開発における一つのネックとなっている。加えてプログラム実装型DSPはハードワイヤDSPに比してまだ価格が高いこと、高速動作になるほど消費電力が増えること等が広範な普及を妨げている要因と考えられる。プログラム実装型DSPによるデジタル制御電源は筆者等を含めて国内外で研究開発が行われているが、DC-DCコンバータに商品として適用するには上記の課題を解決していく必要があるだろう。

筆者は3年程前から電源のデジタル制御化について解説論文を投稿してきたが[15][16]、その後の研究および調査を進める中で判明したこと、見直したいこと、意見として主張したいことが新たに生じてきた。本論文では、ハー

ドワイヤDSPとそれを用いたPOLの実施例を2章に、各メーカのプログラム実装型DSPの特徴および予想される今後の展開を3章に、筆者等がデジタル制御電源の研究用に開発したフルデジタル制御POLの概要を4章に、デジタル制御電源の開発における課題を5章に展開する。そして最後にまとめとして、今後のデジタル制御電源が向かうであろう方向性について考察する。

## 2. ハードワイヤDSP実装電源の実施例

ハードワイヤDSPとは、高速処理が必要な制御演算部分をレジスタや掛け算器等最小限のハードウェアで構成し、その他付加機能である通信やシーケンス処理は、別個に設けたマイコン等の回路で実現している制御ICを意味する。動作がフルインストラクションでないことから厳密にはプロセッサと言えないが、コストパフォーマンスに優れ消費電力も少ないことから、電源の制御部に採用され実用化されている。ハードワイヤDSPは各社から供給されており、これらのほとんどは通信のプロトコルにPMBus方式[17]を採用している。表1に市場で入手可能な数社のハードワイヤDSPを特長と併せて示す。

全てのハードワイヤDSPに共通するのは、通信、モニター機能に加えて、位相補償、出力電圧可変、シーケンス等の設定において、細かく微調整を可能にしていることである。これらの調整は各社が販売促進用ツールの面も兼ねて用意しているGUI (Graphical User Interface) と呼ばれるソフトウェアをPCにインストールしWindows上で表示動作させて設定内容を視覚化している。例えば位相補償の作業に関しては、画面上で実際に表示されたゲイン-位相特性のグラフを見ながら、帯域と位相余裕のトレードオフを考慮しつつ調整することができる。なお、図1はZilker Labs社がWEB上で参考公開している自社ICを使用した20A出力のDO SA規格[18]のピン配置を持つPOL画像[19]である。

表1 ハードワイヤDSP

メーカ	型番	特長
Texas Instruments	UCD9112	PWM175pS UCD7230と組み合わせ使用 PMBus
Zilker Labs	ZL2005	ドライバ内蔵でコンパクト PMBus fsw 最大 2M
Silicon Laboratories	Si8250	マイコンとDSP部を分離 PWM5nS マイコン処理能力 50MIPS

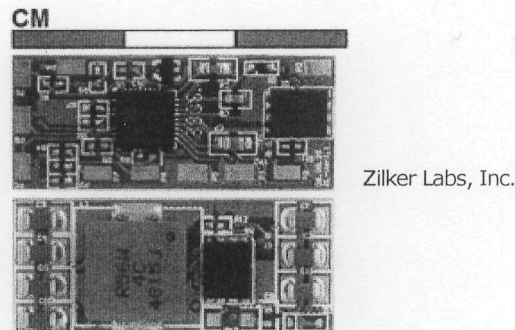


図1 ハードワイヤDSP実装POLの例

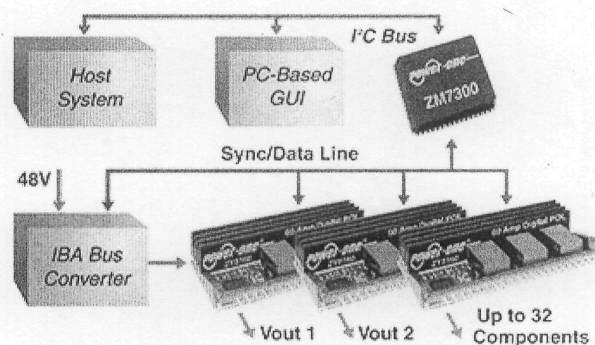


図2 Z-One 電源システム

一方、通信のプロトコルがPMBusでない方式も存在する。Power One 社が提供する独自のZ-One方式プロトコルを持った電源モジュールシステムがそれである。図2[20]にその構成図を示す。

Power One 社はハードワイヤDSPを単体で販売しておらずPOLとして商品化している。POLはシステム的なモニターおよびシーケンシャルな制御が可能で、全部で32式のPOLが専用のマスターIC(ZM7300)に接続され、PC上のGUIで認識および調整ができる。なおPower One社は通信が可能なPOLを広義な意味でパテント化し、PMBus方式の陣営に対して特許係争を起こし、先般Power One社の勝訴が決まっている[21]。本係争はデジタル制御POL全体に及ぼす影響が大きいと考えられ、今後判決の影響を注意深く見守る必要がある。

次に中容量以上で実用化された通信機器用デジタル制御電源の一例を図3[22]および図4[23]に示す。

図3のBMR453はハードワイヤDSPを使用しているようだが、図4のUFE2000は不明である。高密度実装を実現しているため主回路が共振方式ならプログラムによるDSPデジタル制御を行っている可能性もある。なお、BMR453、UFE2000はともに通信プロトコルにPMBus方式を用いている。ここまで述べてきたように、実用化されたデジタル制御電源はコストインパクトと効率低下を抑えつつ、



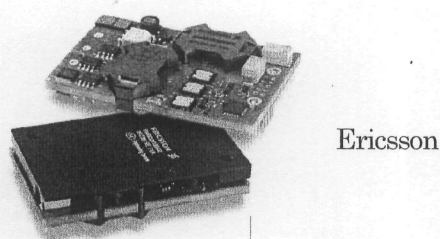


図3 デジタル制御DC-DCコンバータ : BMR453

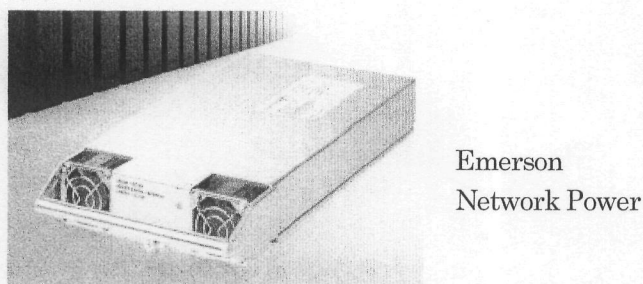


図4 デジタル制御AC/DCフロントエンド電源 : UFE2000

アナログ回路が不得手とする機能を制御ICによって実現していることが分かる。

### 3. プログラム実装型DSP

本来のデジタル制御を過不足なく実現することを可能とするプログラム実装型DSPのここ数年の傾向としては、コアの演算能力を維持しつつ周辺機能であるADコンバータとPWMを高分解能化させており、コストとサイズも電源使用部品の検討域に入りつつある。プログラム実装型DSPは1980年代前半に商品化されたが、1990年代に国産メーカーが撤退してからはTexas Instrument社、Analogue Devices社、Free Scale社を筆頭に米国メーカーの独壇場であった。最近では同じく米国のMicroChip Technology社が参入して低価格路線に拍車がかかり、さらに国産メーカーの新日本無線社が制御計測用DSPを開発中との情報がある[24]。各社のDSPにはそれぞれ特徴があり、これを示す数値のいくつかを表2にまとめる。

ただし、比較対照はカタログ上の数字だけでは不十分であり表2に記した内容以外にも、

- ① コストとデリバリ
- ② 命令セットと実際のプログラム処理速度
- ③ データシートの読みやすさ
- ④ 開発環境の使いやすさ

表2 各社DSPの性能比較

メーカ	型番	特長
Texas Instruments	TMS32F2808	100MIPS動作 8段パイプライン PWM分解能150pS ADC分解能12bit 32ビット固定小数点
Free Scale	MC56F8036	32MIPS動作 4段パイプライン“と推定” PWM分解能96MHz ADC分解能12bit 16ビット固定小数点
MicroChip Technology	dsPIC33F****	40MIPS動作 4段パイプライン PWM分解能1nS ADC分解能10bit 16ビット固定小数点
新日本無線	Cat Fish(仮名)	160MIPS動作 9段パイプライン PWM分解能330pS AD12bit 16ビット固定小数点

- ⑤ コンパイラの性能
- ⑥ サンプルプログラムや事例の充実度
- ⑦ メーカーサポートの良し悪し

等、様々な判断すべき材料がある。また、ターゲットとなる電源の動作仕様や、フェイルセーフ、DSPへの電源供給等、追加せねばならない周辺回路についても考慮に入れる必要がある。DSPを選定する際には上記項目を念頭にトータルな視点で判断しなくてはならない。

今後、制御用のDSPに対してユーザから特に要求されるのは、やはりコストと消費電力であろう。アナログの制御ICはこの面で優れているため、出来るだけ接近させることが望まれる。また現状では、アナログ制御に比べて回路の部品を「無くす減らす」がデジタルの大きなメリットとしてアピールできるため、周辺回路の取り込みと精度アップが一つの鍵となるであろう。DSPメーカーとしてユーザが要望する最大公約数を出すのは難しいところであるが、電源メーカーと連携を取りつつ解を出すことが求められる。

### 4. フルデジタル制御POLの概要

デジタル制御電源を開発する際には、演算時間、ADコンバータの変換時間について検討しなければならない。これらの遅れ時間が制御に及ぼす影響は大きく、一般的にデジタル制御は高速動作には不向きであるとされるため、専

用のICを開発して高速応答を実現した事例もある[25]。これに対して筆者らはプログラム実装型DSPを用いた、負荷急変に対応した高速応答POLの研究開発を行い、過去いくつかの事例発表を行ってきた(例えば[26])。なお、POLは分散給電システムにおける末端のデジタル負荷に対して、一対一で電力を供給する小型の電源を意味する。ターゲットとして試作開発したDSP実装型POLのサイズは1/4ブリックと、さらなる小型化を達成した1/8ブリックサイズの二種類である。使用したDSPはTexas Instrument社のTMS32F2808で、1/4ブリックにはQFPパッケージを、1/8ブリックではサイズがさらに半分に制限されるためBGAパッケージのタイプを採用した。図5に1/4ブリックPOLを、図6に1/8ブリックPOLの写真をそれぞれ示す。なお、プリント基板の層数だが、1/4ブリックは四層パターンであるのに対し、1/8ブリックは倍の高密度実装が必要なことから、八層パターンを採用している。

1/4ブリック、1/8ブリックPOLはともに同一のプログラムで動作している。高速応答の制御動作に加えてPMBusの通信プロトコルを持ち、POLの温度、出力電流、入出力電圧等の回路動作情報を上位であるPCからのモニターすることが可能である。POLの入出力仕様については、入力電圧12V、出力電圧1V、出力電流10Aであり、主回路は降圧同期整流方式、スイッチング周波数は500kHz

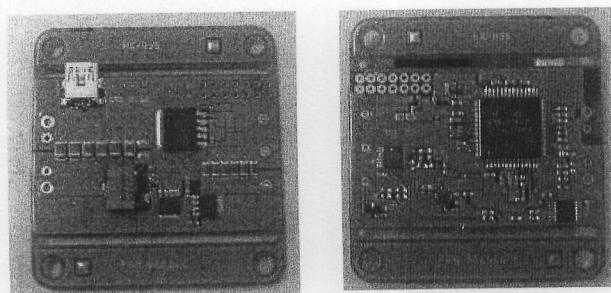


図5 1/4ブリックPOL(左:主回路面 右:制御回路面)

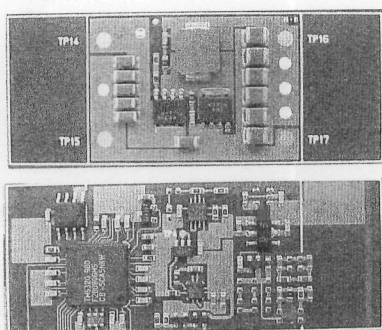


図6 1/8ブリックPOL(上:主回路面 下:制御回路面)

である。高速応答を可能にするデジタル制御式は帯域が広がるよう直接設計法により導出した。図7と図8に出力電流のスルーレートが10A/μsの条件で50%の負荷急変を発生させた場合のPOL各部波形を示す。なお波形の名称は表3に示す通りである。

図7と図8に示されるように、負荷急変時の出力電圧の最大変動値は約75mVに抑制されている。高速応答のためには毎周期のデューティ更新が不可欠であるが、500kHzと比較的速いスイッチング周波数に対して、DSPの高速演算能力とADコンバータの高速変換動作がこれを可能にしている。

以上、述べたように、POLをターゲットとしたプログラム実装型DSPによるデジタル制御で、高速応答動作および電源サイズの小型化実現が可能であることを示せた。さらにプログラムを高機能化することにより、ロバスト性と適応性を図ることが期待できる。

表3 負荷急変波形各部名称

チャネル番号	波形名称
CH1	出力電圧
CH2	ハイサイドMOSドライブ信号
CH4	出力電流

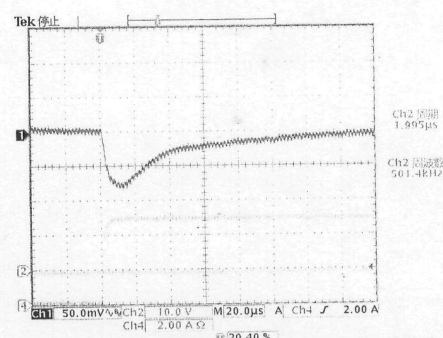


図7 デジタル制御POLの負荷急増特性

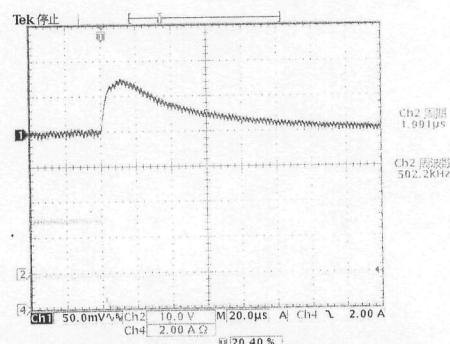


図8 デジタル制御POLの負荷急増特性



## 5. デジタル制御電源の開発における課題

本章では、デジタル制御電源を開発するにあたり、課題もしくは問題点として挙げられる事項を考えてみたい。数年前と比べてDSPを小中容量の電源に活用することは現実的になったとはいえ、コスト、消費電力、サイズの点で、まだアナログ制御ICの方に一日の長がある。デジタル制御のメリットがこれらを凌駕して余りある事態になっていないことが普及が予想以上に進まない主な理由であろう。しかし、半導体技術の進歩、量産効果、周辺機能の絞込みによってこれらの課題についてはやがて解決していくと予想できる。また、開発期間の短縮という見地からは、プログラムによる設計変更の容易さでデジタルの方に今後は分があると思われる。

デジタル制御が困難であると考えられる事情の一つに、実は肝心のプログラム開発がある。電源の技術者は基本的にアナログ回路を専門としているため、技術的に全く接点がないプログラムに関しては、「できれば避けたい」存在である。このためプログラム開発と回路設計は別の人間が行うことが多い（一度アナログ回路で設計検証してからデジタル化をする事態も想定され開発速度のアップと逆行する）。プログラマーが電源回路を設計しようとする場合も全く同様であり、特にアナログ回路は修得までに年数を要することから単独でスムーズな開発は難しい。アナログ回路とデジタル制御の双方を理解修得している技術者は少なく、これを解決するのは双方の技術者の意欲はもちろんのこと、計画的な教育とレベルに合わせた開発品への取り組みが重要であろう。

次に開発環境と設定について述べたい。プログラム開発をする際にターゲット上に実装されたDSPを模擬的に動作させるデバッグ環境は、使いこなせるようになるまで苦勞を要する。各DSPメーカーはそれぞれ独自に開発環境を用意しているが、それぞれファイル管理の思想や組み込み型言語が微妙に異なることで扱い易いとは言えない。さらにメーカーはほとんどが米国籍であるため言語は当然全て英語であり、困った際のHELP画面にてさらに困った開発者も少なくないであろう。日本語の開発環境実現が望まれる。また、実際にDSPを動かすには、ADコンバータやPWM等の周辺を含む様々な機能を一つ一つ設定していく必要があり手数がかかる。いわゆる初期設定と呼ばれるルーチンだが、使おうとするDSPが初物であった場合は分厚いデータシートを睨みながら必ず経なければならない作業であるため、これを避けたいがために選定時において互換性のあるシリーズに流れてしまう事態も有り得る。筆者の意見としては、PCにアプリケーションソフトをインストールするが如く、会話形式で初期設定を漏れなく行

える操作の実現が望ましい。普遍的で実績のある事例プログラムをメーカーに用意して貰うことも有効である。

電源メーカーにおけるデジタル制御への取り組みは未だ黎明期で蓄積も少ないことから、その普及にあたっては相当の努力を要することをまず第一に理解しなければならない。その上でデジタル制御の有用性を享受するための、プログラムパッケージ化による「汎用性向上」、処理ルーチンの「見える化」、によって品質を確保していくことが今後取り組む必要がある大きな課題であろう。

## 6. まとめ

通信機器装置におけるデジタル制御電源の現状および普及についての課題を述べた。ここまでのところ、電源のデジタル制御化はアナログ回路の置換えレベルであり、普及の決定打となる要素はまだ出ていない。デジタル制御電源が本当の意味で無くてはならないとされるには、次の二点が達成された時であると推察する。

### ① 適応制御および知能的動作実現

今後は多様な負荷および入力インピーダンスに対応可能な、フレキシブルな安定制御系が必要になる可能性がある。また、環境保全のための省エネルギーの観点から、電力の一括集中管理を行い最適な制御モードを電源に与える、もしくは電源自身が判断して制御モードを変える方式が理想的である。これらの要求に対してデジタル制御は適応制御や知能的動作によってその解を提供できるのではないかと

### ② 主回路の変革

デジタル制御電源が必須であるとされるなら、制御される主回路動作がデジタル制御無しに実現できない場合が生ずればそれに該当するであろう。現状のデジタル制御が対象としている電源主回路は以前から存在するものであり、これがアナログ回路の置換えと言われる所以である。制御動作は複雑でアナログ回路では実現できないが、部品点数はあまり増えず効率性は抜群に良い等の特徴を持つ回路方式を確立できれば、デジタル制御電源は大きな優位性を主張できるだろう。

以上を今後期待される展望とし、本稿のまとめとする。

## 参考文献および記事

- [1] 室山誠一, 松島敏雄, 村上直樹 “情報通信用電源システムの課題と動向” 信学論(B) Vol. J84B No. 5 2001年5月
- [2] 原田耕介 “情報通信用電源の動向と問題点 - 低電圧大電流化への対応 -” 信学論(B) Vol. J84B No. 12 2004年12月
- [3] 竹下隆晴, 白井明, 松井信行 “DSPを用いたスイッチング電源のソフト制御法” 信学論(B) Vol. J84B No. 4 1999年4月
- [4] Special Issue in Digital Control in Power Electronics Steven

B. Leeb IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS VOL. 18 NO. 1, JANUARY 2003

[5] Robert V. White "Digital Power System Management" APEC2005  
[6] 山本眞, 渡辺篤志, 宇敷修一 "汎用デジタル制御バック" オリジン電気 Technical Journal No. 69

[7] 薩川格広 "デジタル制御を得て電源の進化が始まる" EETIMES Japan No. 8 2006. 2

[8] 川村祥子 "汎用電源にデジタル化の波" EDN Japan No. 61 2006. 3

[9] Margery Conner "見えてきたデジタル電源の真価" EDN Japan No. 66 2006. 8

[10] Microchip Technology Japan "デジタル電源技術フォーラム2008"

[11] Reed Business Information "第4回パワーマネジメント・セミナー"

[12] 多田信裕 "四輪ハイブリッド車用DC/DCコンバータの製品紹介" 新電気工業広報誌 PassWord Vol. 05-20 January. 2006

[13] "TDKが自動車メーカー向け戦略を明らかに" EDN Japan 2006.04.21

[14] 津田建二 "ベルキスが200Wで70mm×20mmのデジタル電源を展示"

EDN Japan 2006. 6

[15] 野崎幸弘, 曾禰元隆 "小型スイッチング電源のデジタル化" S<sup>2</sup>PATJ 第9巻第1号 平成18年6月

[16] 野崎幸弘 "デジタル制御電源の動向" 2008 IEICE 秋エディ大会講演論文集 BS-8-1

[17] <http://pmbus.org/>

[18] <http://www.dosapower.com/default.asp>

[19] [http://www.zilkerlabs.com/273/Design\\_Gallery.htm](http://www.zilkerlabs.com/273/Design_Gallery.htm)

[20] <http://www.power-one.com/board-mount/digital-power-management/bus-programmable-digital-pols.html>

[21] <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=73416&p=irol-newsArticle&ID=1130220&highlight=>

[22] Ericsson Technical Specification BMR453 EN/LZT 146395 R1A June 2008

[23] <http://www.powerconversion.com/products/websheet/393/UFE1300-2000-UFR6000>

[24] Embedded Technology West DSP Track Conference D2

"新日本無線(株)製デジタル・シグナル・コントローラの基本アーキテクチャ"

[25] B. J. Patella, A. Prodic, A. Zirger, Dragan Maksimovic, "High-Frequency Digital PWM Controller IC for DC-DC Converters"

IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 18, NO. 1, JANUARY 2003

[26] 野崎幸弘 "DSPによる電源のデジタル制御と高機能化" 2007 スイッチング電源・バッテリーシステムシンポジウム

## 著者紹介

野崎 幸弘 (正会員)



1987年4月新電気工業入社。システム製品の開発設計を担当し、その後電源回路技術の研究開発職に従事、現在に至る。電気学会、高速信号処理応用技術学会会員。

曾禰 元隆 (正会員)



昭40武蔵工大・電気卒。昭43同大学大学院修士課程修了。平2年4月同教授。平19.3定年退職。同年3月株DSP応用技術研究所設立。代表取締役。工学博士。主として有機絶縁破壊機構、気体放電現象、電力系統における高速演算、ニューラルネットワーク、ファジィの電力への応用、DSPの研究に従事。電気設備学会、電気学会、IEEE、計測自動制御学会各会員。

竹田 史章 (正会員)



'94 徳島大大学院工学研究科博士後期課程修了。'84 豊田中央研究所、'86 グローリー工業(株)。現在、高知工科大教授。工博。現在、自己学習型知的貨幣識別手法の研究とその実システムへのインプリメンテーションの研究、生体情報を用いた個人認証システムの研究とそのプロトタイプの開発、ニューラルネットワークを用いた画像認識による食事摂取状態のレベル分類システムの研究と開発、紙幣の汚れ・劣化メカニズムの解析とモデリングおよびその判定システム構築の研究に従事。日本機械学会関西支部賞(研究賞)、計測自動制御学会論文賞、高度自動化技術振興財団研究業績表彰(本賞)、新技術開発財団市村学術賞(功績賞)、システム制御情報学会産業技術賞受賞。日本機械学会、電気学会、計測自動制御学会、IEEE、システム制御情報学会、情報処理学会、電子情報通信学会会員。