

マルチタスク実装マルチメディアに対する 周波数-電源電圧協調型電力制御

三坂 智† 十山 圭介† 在塚 俊之† 相坂 一夫† 内山 邦男†

川口 博‡ 桜井 貴康‡

†株式会社 日立製作所 中央研究所 〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280

‡東京大学 国際・産学協同センター 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: †smisakas@crl.hitachi.co.jp

あらまし 携帯電話の高機能化に伴い、ベースバンドプロセッサの他に更にアプリケーション処理専用のアプリケーションプロセッサの搭載が一般化している。今後更に多様な携帯電話サービスの開発、運用を実施するにはアプリケーションプロセッサ性能の他にバッテリー持ち時間延長の為に低消費電力化が要求されている。本報告では既に報告のシングルタスクアプリケーションへの省電力化を発展させる為、マルチタスクアプリケーションの代表例で実際に携帯電話に搭載されている動画音声再生ミドルウェアに対して周波数-電源電圧協調型制御組込みソフトウェアを適用し、制御を加えない場合と比較して動作時の平均消費電流を約50%に削減出来たことを報告する。

キーワード Low Power, マルチタスク, アプリケーションプロセッサ, 周波数-電圧協調型制御, デッドライン

Frequency-Voltage Cooperative Power Reduction for Multi-tasking Multimedia Applications

Satoshi MISAKA†, Keisuke TOYAMA†, Toshiyuki ARITSUKA†, Kazuo AISAKA†,

Kunio UCHIYAMA†, Hiroshi KAWAGUCHI‡, and Takayasu SAKURAI‡

†Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd. 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601 Japan

‡Center for Collaborative Research, University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904 Japan

E-mail: †smisakas@crl.hitachi.co.jp

Abstract Mobile applications, especially for cellular phones, need to satisfy the requirement for low power consumption keeping multimedia performance high enough. Thus software and hardware combined approach for low power becomes really important. One of such techniques is frequency-voltage cooperative control that lowers the MPU clock and core voltage at the same time when maximum execution speed is not necessary. We applied multi-tasking audio-visual player to frequency-voltage cooperative control with application processor. Frequency-voltage cooperative control makes 50% current reduction under multi-tasking audio-visual player.

Keyword Low Power, Multi-Task, Application Processor, Frequency-Voltage Cooperative Control, Deadline

1. はじめに

近年の半導体技術と通信技術の発展を背景に携帯電話サービスが世界的に普及している。日本の携帯電話サービスでは第1世代のアナログ方式から端を発し、第2世代のデジタル方式を経て、2001年からは第3世代として国際ローミングや高速データ通信を特徴

とする本格的なマルチメディアサービスがスタートした。年々着実にシステム、サービス共、高性能化及び多機能化が進んでいる。

第1世代及び第2世代携帯電話では、音声サービス、電子メール、Webブラウザ、着メロ（着信メロディー）が主なアプリケーションであったが、第3世代の移行期である第2.

5 世代では液晶ディスプレイ (LCD) 画面のカラー化及び QVGA 等の高精細化、そして 100 万画素クラスの CCD または CMOS 小型カメラ等の魅力的なユーザーインタフェースデバイスの搭載によって、静止画送受信、Java を応用したゲーム、音楽配信及び再生等のアプリケーションが追加されるようになった。更に第 3 世代では高速データ通信の特典を生かした MPEG-4 (Moving Picture Expert Group 4) に代表される動画音声圧縮符号化技術を適用したビデオメール送受信、動画配信、テレビ電話等のアプリケーションが導入され始めている。

これらの第 2.5 から第 3 世代のアプリケーションでは高性能で多機能なプロセッサ処理性能が要求されている事から従来のようにベースバンドプロセッサで全ての処理を行うことが困難になってきた。そこでベースバンドプロセッサの処理負荷を軽くし且つ、高速にマルチメディアの処理を行う為、Fig.1 に示すとおり、通信プロトコル処理はベースバンドプロセッサで行い、マルチメディア処理はアプリケーションプロセッサ [1] で行うという動向が顕著になってきた。

しかし今後も高度なマルチメディア処理をアプリケーションプロセッサで実行することは処理負荷が増大する分、更に携帯電話が電力を消費することを意味し、電池寿命による電池の廃棄を促進させる。昨今の ISO 14001 により、地球資源枯渇に繋がる問題は最早、国際的な規模で環境・社会問題となっている。

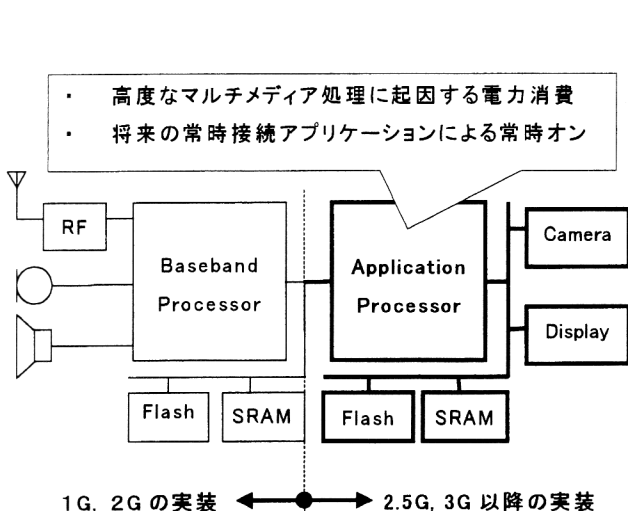


Fig.1 携帯電話システム構成

また 2003 年現在の携帯電話アプリケーションサービス運営形態は携帯電話機を Client とした Client-Server (C/S) 型アプリケーションが主体である。従って端末間通信の接続要求の受付機能が非対称であるが故に携帯電話の待受け状態の機会が多い。しかし今後、端末間対称通信が可能な Peer-to-Peer 型アプリケーションや Server から携帯電話へのプッシュ通知が可能な C/S 型アプリケーションや携帯電話からの情報発信が可能なアプリケーション等、常時接続のサービスの実現も期待されている。従って携帯電話機は待受け主体の実装の他に常時オン主体の実装も考慮する必要がある、ますますアプリケーションプロセッサの動作時の低消費電力化が必要となってくる。

一方 LSI の低消費電力化技術は“Moore の法則”に従って LSI の微細化を向上していくと同時に電源電圧を下げていくことが一般的であった。しかし昨今では微細化技術が成熟し、これ以上微細化を施していくと Fig.2 の LSI 電圧スケールアップの概念図のように LSI のリーク電流分の電力消費が指数的に膨大化し、待受け時に無駄な電流を消費してしまうという状態に陥る [2]。そこで携帯電話に組み込むソフトウェアでプロセッサのマルチメディア処理の負荷を監視し、負荷の大きい部分では電源電圧及び動作周波数を高く割り当て、負荷が小さい部分ではそれらを低く割り当てるといふ、電源電圧-動作周波数制御を導入することが先に提案されている [3]。

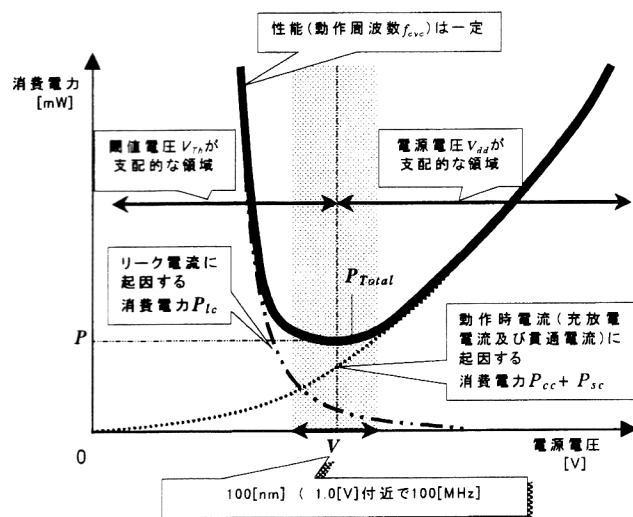


Fig.2 性能一定時の電圧スケールアップの概念図

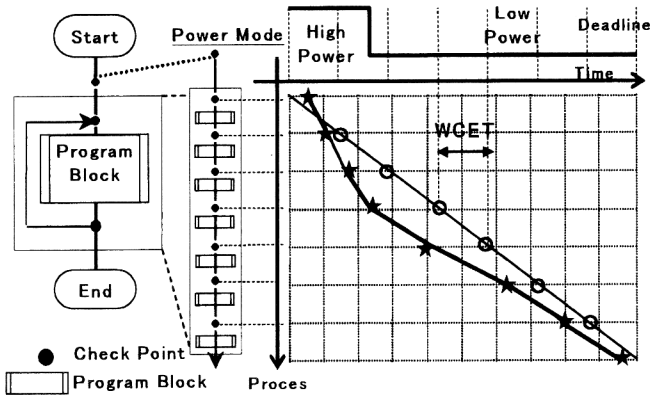


Fig.3 Task 内部の電力割当及び時間調整方法

特に MPEG-4 Video の Encoder、Decoder 等、シングルタスクに電源電圧-動作周波数制御を導入した例[3][4]が多いが未だ、マルチタスクに導入した報告は未だ少ない。

本報告では RTOS (Realtime Operating System) 上で駆動するマルチタスクアプリケーションの代表例として動画音声再生ミドルウェアを題材とし、そのミドルウェア上に電源電圧-動作周波数協調型制御ソフトウェアを組み込み実装し、実際の動作させた。その結果、電源電圧-動作周波数協調型制御を実装する以前と比較し、平均消費電流を約 50 % 削減、つまり電源電圧下げ率の二乗以上の電力を削減出来ることを確認した。

2. 電源電圧-動作周波数協調型電力制御

組み込みソフトウェアによる一般的な低消費電力化は、いち早く処理を終了させて、Deadline まで、最低優先度の Power Save Task で Idle 時のプロセッサへの動作 Clock の供給を絶つという方法である。

ここで消費電流の大部分が CMOS 回路の充放電電流で占めていると仮定し、消費電力 P_{cd} スイッチング回数を Sw_i 、寄生容量を C_i 、電源電圧を V_{dd} 、動作周波数を f_{cyc} 、プログラムの実行時間及び実行サイクルをそれぞれ T_{exe} 、 E_{exe} とすると、消費エネルギー W_{cd} は式 (1) と表すことが出来る。

$$W_{cd} = P_{cd} \cdot T_{exe} = \sum_i (\delta_i \cdot C_i \cdot f_{cyc} \cdot V_{dd}^2) \cdot \left(\frac{E_{exe}}{f_{cyc}} \right) \\ = V_{dd}^2 \cdot \sum_i (\delta_i \cdot C_i) \cdot E_{exe}$$

・・・(1)

式 (1) より消費エネルギー W_{cd} は電源電圧

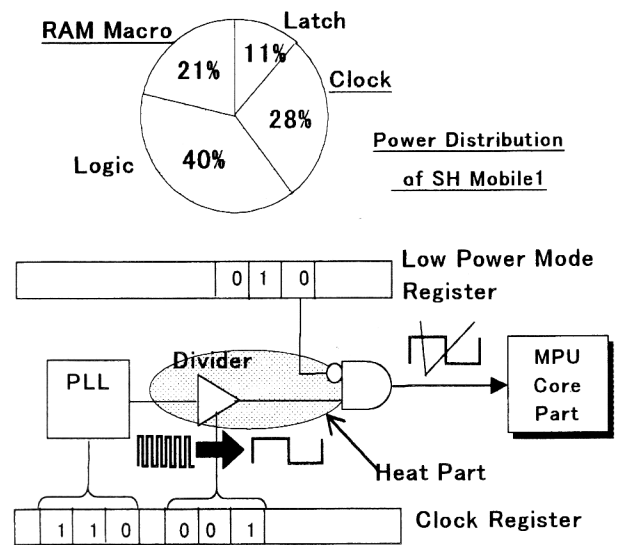


Fig.4 消費電力分布と動作 Clock 電力削減法

の 2 乗及び実行サイクルに比例することが分かる。従って高電源電圧、高動作周波数でいち早く終了させてから Power Save Task を起動する方法よりも処理の途中で低電源電圧、低動作周波数の処理も入れた方が省電力を実現出来る。但し低電源電圧動作の場合にはプロセッサの性能上、低動作周波数駆動の必要がある。故に周波数を低くした分に反比例して駆動時間が長くなる。電源電圧-動作周波数電力制御では如何に時間調整しながら Deadline を守って低動作周波数を割り当てるかが技術ポイントとなる。

Fig.3 はタスク内部での時間調整及び電力割当方法を示した図である。マルチメディア処理はプログラムブロック毎の処理が多い。そこでプログラムブロック処理単位で処理経過を監視し、時間調整を行う方法が提案されている[5][6][7][8]。Fig.3 の WCET (Worst Case Execution Time) は Deadline をプログラムブロック数で割った時間である。

マルチタスクにおいて電源電圧-動作周波数電力制御を適用して時間調整を行うには、各タスクが各々の WCET を自己監視し、Fig.3 の○の時刻に間に合っていれば High Power Mode (低電源電圧、低動作周波数) を、間に合っていなければ Low Power Mode (高電源電圧、高動作周波数) を割り当てることが有効である。

更にリアルタイムスケジューリング理論から、少処理量 Task ほどタスク優先度を高くす

ると同時に High Power Mode を割当てることが有効である。高動作周波数を割当てると割込み時間が短縮出来、省電力化が図れる。

また電源電圧-動作周波数制御を施しても余裕時間がある場合がある。この場合、Power Save Task の採用が最も有効である。しかし Fig.4 の一般的なプロセッサの消費電力分布に着目すると、動作 Clock が占める消費電力は比較的大きい。Power Save Task が起動している時も PLL は動作中であり、Timer 割込みで発生する消費電流は意外と高い。そこで Power Save Task 内で PLL の通倍率または分周率を操作することで動作周波数を下げる方法を採用することも省電力化に有効である。

以上、本稿ではタスク毎の電源電圧-動作周波数制御と Power Save Task を総称して、電源電圧-動作周波数協調型制御と呼ぶことにする。

3. 実装

電源電圧-動作周波数協調型制御を適用した評価用組み込みシステムを試作した。

制御対象となるマルチタスクシステムには MP4 Player を用いた。MP4 Player は Download 型 AV File を先ずロードし、Video Bit Stream、Audio Bit Stream 及び再生時間情報に分解する。そしてその分解した Video 及び Audio Bit Stream を各々復号化する。更に復号化した Video 及び Audio Frame を先に得た再生時間情報に従って Display 及び Speaker 上に出力する。今回の試作では Video Decoder を MPEG-4 Vide Simple Profile、Audio Decoder

を MP3 とした。RTOS には日本の携帯電話で最も使用されている μ ITRON Ver.4.0 を用いた。

Fig.5 はソフトウェアアーキテクチャ、つまりソフトウェアの呼び出し関係を表している。下位層の “Passive Object Layer” は Engine 部で、MPEG-4 Video Decoder、MP3 Decoder そして MP4 File DeMux というミドルウェア、及びデバイスドライバを実装した。電源電圧-動作周波数協調型電力制御ミドルウェアはこの階層に実装した。上位層の “Active Object Layer” は Task (Thread) 部で “Passive Object Layer” の各ミドルウェアやデバイスドライバを呼び出す。

Fig.6 は Task アーキテクチャを表している。一般的に画像が途切れるよりも音声音楽が途切れる方が印象が悪い。従って Video よりも Audio の方を高く、タスク優先度を割り当てた。また Audio 関連 Task を高優先度にする事は “少処理量、つまり短実行時間の Task ほどタスク優先度を高くする” というリアルタイムスケジューリング理論にも合致する。Fig.3 のプログラムブロックに相当する処理は、MPEG-4 Video Decoder Task では Macro_block 処理、MP3 Decoder Task では granule または Channel 処理である。

制御対象アプリケーションプロセッサは Fig.7 に掲載の SH Mobile 1 とし、評価ボードとしては SH Mobile 1 搭載の SH SolutionEngine を用いた。

SH Mobile 1 は動作周波数を変えることは可能だが電源電圧を可変にする機構は備えてはいない。そこで Fig.8 のように SH Mobile 1 の CPU Core 電源電圧端子及びデカップリングコンデンサー群の前段に可変電源電圧回路を

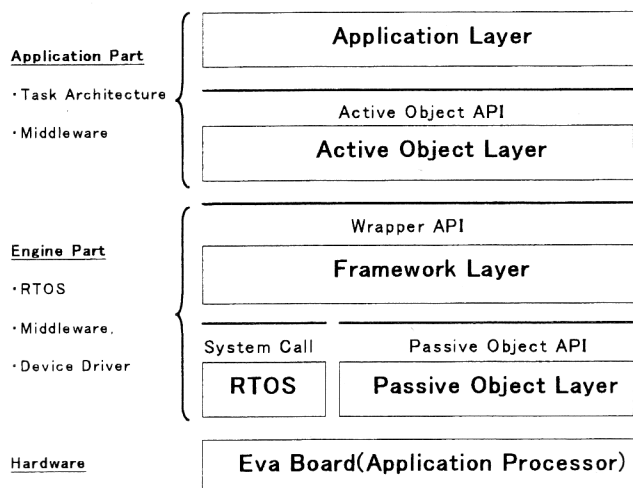


Fig.5 ソフトウェアアーキテクチャ

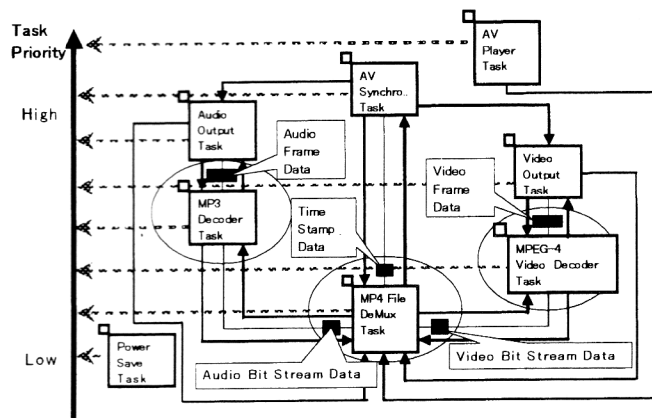


Fig.6 タスクアーキテクチャ

追加実装した。Fig.9 はその全体の評価システムを表している。

可変電源電圧回路を操作する電源電圧-動作周波数協調型電力制御ミドルウェアの API は “Passive Object Layer” または “Active Object Layer” から逐次呼び出される。上記 API の内、電源電圧及び動作周波数を制御する操作手順を Fig.8 中の番号に示す。

- ① SH Mobile 1 の制御レジスタを使って PLL 回路と Application Processor に印加する電源電圧を変えた場合の安定時間（プロセッサ待機時間）を Watch Dog Timer で設定、
- ② GPIO から可変電源電圧回路に対して Application Processor に印加する電源電圧を低くまたは高く設定するように、ON/OFF 信号を出力し、分圧比を切替え、
- ③ 上記制御レジスタで動作周波数の分周比を低くまたは高くするように設定する。

4. 評価結果

試作した可変電源電圧対応評価ボード上で、電源電圧-動作周波数協調型電力制御ミドルウェア搭載 MP4 Player の低消費電力効果の評価を以下に報告する。

評価条件は Table 1 に記載の評価パラメータを用いた。MP4 File DeMux のコンテンツは現在の携帯電話アプリケーションを想定した仕様及び品質、つまり Video 部、Audio 部及びその他の情報を含め、伝送レートを 64[kbps] になるように設定した。

一方 Application Processor に対する制御範囲は、High Power Mode で電源電圧 1.5[V]、動作周波数 120[MHz]、Low Power Mode で電源電圧 1.25[V]、動作周波数 60[MHz] とした。また電源電圧-動作周波数切替時間（プロセッサ待機時間）は 100[μsec] である。

同じ Scene（処理経過時刻）でトリガをかけて得られた 0.1[sec] 間の評価結果が Fig.10 及び Fig.11 である。Fig.10 は制御を加えていない時の消費電流時間特性、Fig.11 は制御を加えた時の消費電流時間特性である。Fig.10、11 共、上側が電源電圧、下側が消費電流を表している。消費電流の測定点は Fig.8 に記載のとおりで電流プローブを用いて計測した。

Fig.10 から 104.57[mA/sec]、Fig.11 から 46.86[mA/sec] の平均消費電流が得られた。両者の比較から平均消費電流では約半分以上の

低減効果が得られた。この結果から携帯電話に搭載の Li-ion2 次電池の持ち時間も約倍になると見積もる事が出来る。更に電力で換算すると電源電圧の 2 乗に比例するという理論から、約 1/4 前後の低消費電力効果が期待出来る。マルチタスクアプリケーションに対

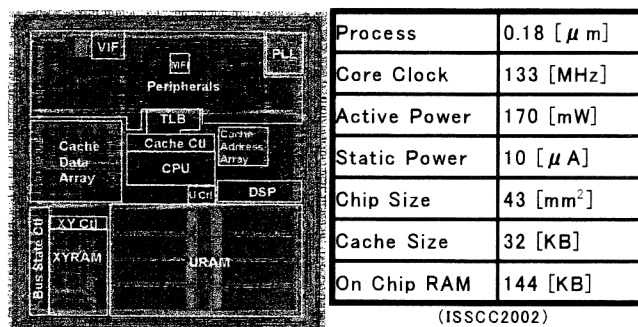


Fig.7 SH Mobile 1 仕様

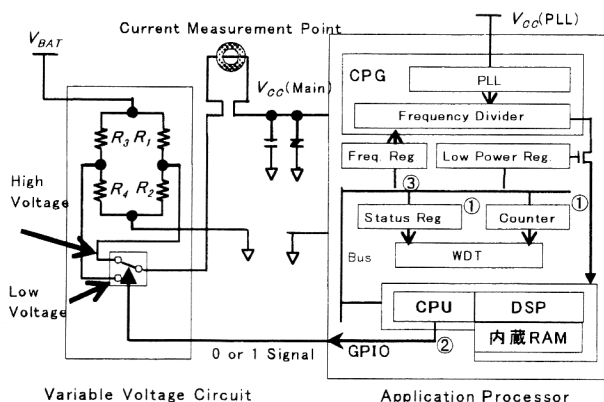


Fig.8 可変電源電圧対応ハードウェア構成

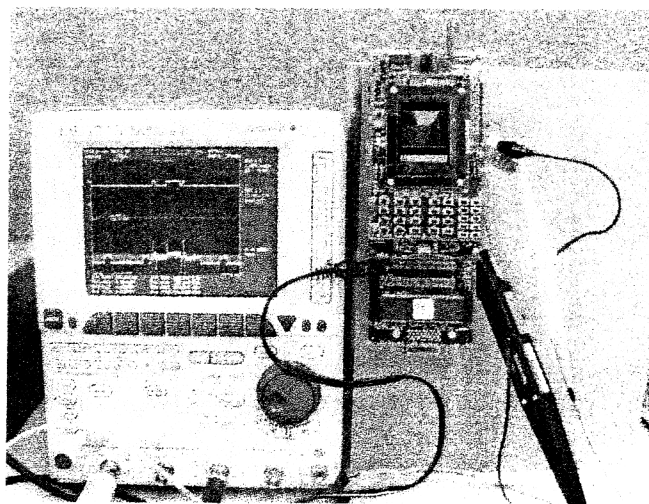


Fig.9 評価用組み込みシステム

Table 1 評価パラメータ表

Evaluated Board		SH SolutionEngine	
Application Processor		SH Mobile 1	
Power Mode		High	Low
Source Voltage Control Scope		1.5 [V]	1.25[V]
Clock Frequency Control Scope		120 [MHz]	60 [MHz]
Wait Time		100[μ sec]	
RTOS		μITRON Version 4.0	
AV DeMux MP4 File Format (ISO/IEC 14496-1)	<u>Video Decoder</u> MPEG-4/Visual Simple Profile (ISO/IEC 14496-2)	Bit Rate	32[kbps]
		Frame Rate	10[fps]
		Picture Size	Sub-QCIF (128 × 96) [pixels]
	<u>Audio Decoder</u> MP3 ... MPEG-1/Audio -Layer III (ISO/IEC 11172-3) MPEG-2/Audio -Layer III Low Sampling Frequencies (ISO/IEC 13818-3)	Bit Rate	32 [kbps]
		Sampling Frequency	22.05 [kHz]
		Channel	2 [ch.]
Total		Bit Rate	64 [kbps]

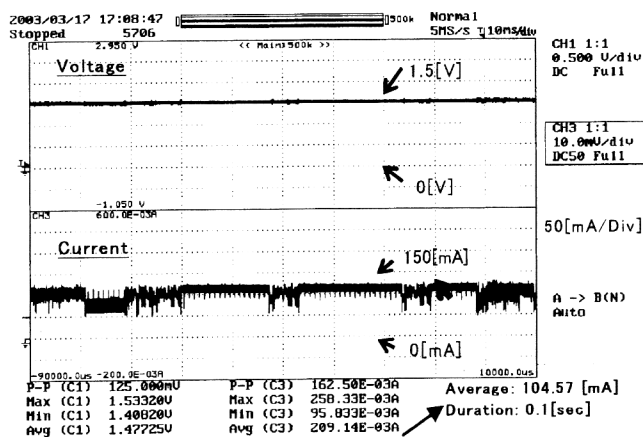


Fig.10 制御しない場合の消費電流時間特性

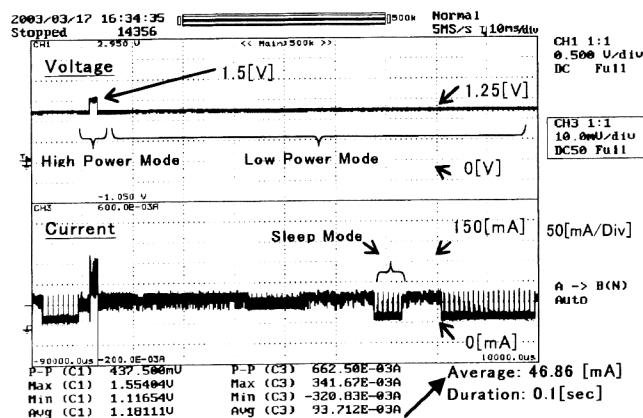


Fig.11 制御した場合の消費電流時間特性

しても電源電圧-動作周波数協調型電力制御が有効であることがわかった。

5. まとめ

本稿ではアプリケーションプロセッサ上で動作するマルチタスクアプリケーションの代表例として MP4 Player に対して電源電圧-動作周波数協調型電力制御ミドルウェアを施し、その低消費電力効果を評価した。その結果、制御を加えない従来の場合と比較し、平均消費電流で約 50%の低減効果を確認することが出来た。このことは従来よりも電池の駆動時間を約倍化させる可能性があることを意味し、更にこれを消費電力に置き換えると電源電圧の 2 乗に比例することから従来と比較して約 1/4 の削減効果を見積もることが可能なが分かった。

文 献

- [1] T. Yamada et al., "A 133MHz 170mW 10μA Standby Application Processor for 3G Cellular Phones", ISSCC Digest of Technical Papers, pp.370-371, Feb. 2002
- [2] 宮崎, 他 "超低電力システム LSI 向け 0.1V-CMOS 集積回路 - 低電力回路技術の課題と対策 -", 信学技報, ICD2002-60, p.85-90, 8, 2002
- [3] 石原, 他 "可変電圧プロセッサを用いた省エネルギー化のための基本定理", 信学技報, ICD98-45, p.69-76, 5, 1998
- [4] 川上, 他 "フィードフォワード動的電圧制御による MPEG4 低消費電力化アルゴリズム", 信学技報, ICD2002-57, p.67-72, 8, 2002
- [5] 川口, 他 "低電力実時間組込みシステムのための OS, アプリケーション, ハードウェア協調による CVS (Cooperative Voltage Scaling) と電圧ホッピング", 信学技報, ICD2001-32, p.59-66, 5, 2001
- [6] K. Aisaka, T. Aritsuka, S. Misaka, K. Toyama, K. Uchiyama, K. Ishibashi, H. Kawaguchi and T. Sakurai, "Design Rule for Frequency-Voltage Cooperative Power Control and Its Application to an MPEG-4 Decoder", 2002 symp. VLSI circuits, pp216-217, June 2002
- [7] 相坂, 他 "周波数-電圧協調型電力制御における使用周波数群決定方法の提案と MPEG-4 デコーダによる検証" 信学技報, ICD2002-37, p.13-16, 7, 2002
- [8] 相坂, 他 "周波数-電圧協調型電力制御におけるアルゴリズムとデザインルール", 信学技報, ICD2002-72, p.49-52, 8, 2002
- [9] S. Misaka, K. Toyama, T. Aritsuka, K. Uchiyama, K. Aisaka, H. Kawaguchi and T. Sakurai, "Frequency-Voltage Cooperative Power Reduction for Multi-tasking Multimedia Applications", COOLChips VI, Vol.1, pp103-116, April 2003