



## OSレベルの解析に基づく携帯端末の消費電力可視化技術

携帯端末の消費電力と消費の原因となる機能を可視化し、省電力ソフトウェア開発の効率化を実現するため、アプリケーション実行時のCPU稼働率などOSから容易に取得できる情報を基に端末全体の消費電力を実測せずに算出する方式（消費電力モデル）について研究を行った。

なお、本研究は九州大学 システム LSI 研究センター（石原 亨准教授）との共同研究により実施した。

先進技術研究所  
かみやま たけし かたぎり まさじ  
神山 剛 片桐 雅二

### 1. まえがき

携帯端末の普及に伴い、電子機器の低消費電力化が重要になってきている。消費電力の削減を検討するうえで、設計段階で消費電力を評価する仕組みだけでなく、任意のアプリケーション使用など実際のシステム稼働時も想定した消費電力の見積り技術が必要である。

従来の消費電力見積り手法の多くは、主にハードウェアの設計過程での評価・改善を目的とし、論理ゲート<sup>\*1</sup>やハードウェアモジュールごとの消費電力をモデル化し、そのモデルに基づき対象とするシステム全体の消費電力を計算する。多くの手法は、これらの物理情報とハードウェアシミュレーションによる稼働率情報に基づいて計算している。しかし、ハードウェアシミュレーションにかかる計算負荷が非常に大きいため、この技術をシステム稼働時の見積りに適用することは現実的ではな

い。例えば、数千ステップ分のソフトウェアの平均消費電力を見積る場合、約1時間の計算を必要とする[1]。また、これらの手法はプロセッサや主記憶のみを対象にしたものが多く、実際の携帯端末のように無線通信やストレージなども含めたシステム全体の消費電力を解析するものとはなっていない。

一方、システム稼働時の消費電力を計測する方法として、電力計測回路をシステムに搭載する手法などが考えられる。しかし、これらはシステム全体の消費電力を計測するのみで、ハードウェアやソフトウェアの機能ブロックごとの電力内訳を解析することはできない。このため、省電力なアプリケーションを開発しようとしても、何が原因で電力消費が起こっているのかを判別することは困難である。

本稿では、アプリケーション実行により消費される電力を小さい計算負荷で正確に見積るだけでなく、ソフトウ

ェアレベルで観測可能な携帯端末の基本機能やプロセスごとの消費電力解析も可能にする消費電力モデルと、その生成手法について解説する。

なお、本研究は省電力システム LSI 設計技術研究で実績のある九州大学 システム LSI 研究センター 石原 亨准教授との共同研究により実施した。

### 2. 消費電力モデルと生成技術

従来手法も含め、本稿における消費電力  $P_{estimated}$  モデルとは、対象システムの消費電力を、パラメータ  $P_i$  を引数として算出できるよう数式化したものである。一般的に、このようなモデル式には、式(1)に示す線形式を用いた手法が数多く提案されている[1]。

$$P_{estimated} = C_0 + \sum_{i=1}^N C_i \cdot P_i \quad (1)$$

ここで、 $C_i$ 、 $C_0$  および  $N$  は、それ

\*1 論理ゲート：論理演算を行う電気回路または素子。

それぞれパラメータの係数，定数項およびパラメータの数を示す。

また，消費電力モデルの生成手法とは，モデルの数式化とその数式を構成する係数 $C_i$ を求める手法（モデリング）のことであり，重回帰分析法<sup>\*2</sup>を用いている。

重回帰分析を用いたモデリングの多くは，測定した消費電力値とパラメータ値をサンプルデータとして式(1)に代入し，モデルフィッティング<sup>\*3</sup>により係数 $C_i$ を求める。一般的には，フィッティングには最小二乗法<sup>\*4</sup>が用いられる。最小二乗法を用いた重回帰分析は，式(2)に示す $\epsilon_j$ の二乗和を最小化する $C_i$ の集合を決定する手法である。

$$PM_j = C_0 + \sum_{i=1}^N (C_i \cdot P_{ij}) + \epsilon_j \quad (2)$$

ここで， $PM_j$ ， $P_{ij}$ ， $\epsilon_j$ は，それぞれサンプル $j$ における消費電力の測定値，パラメータ $i$ の値，モデル誤差である。

重回帰分析ではパラメータ間の相関が強いと，有効な重回帰式が得られないことが知られている。相関の強いパラメータが2つ以上存在すると，どちらのパラメータがどの程度消費電力に影響を与えるかが判定できないためである。この性質は多重共線性と呼ばれる[2]。多重共線性が観測された場合には，片方のパラメータを除去することでこの問題を解消できるが，除去したパラメータが対象システムの消費電力に対して大きな影響力をもつ場合には，モデル精度の低下を招くことになる。ま

た，重回帰分析に使用するサンプルに統計的偏りが存在する場合には，多重共線性の問題を解消できない。

そこで，多重共線性の問題が発生しないようなテストベンチ<sup>\*5</sup>を意図的に生成することにより，影響力の大きい少数のパラメータを用いて精度よく携帯端末の消費電力をモデル化する手法を提案する。

### 3. 提案手法

#### 3.1 消費電力モデル

本稿で提案する消費電力モデルは重回帰分析によりパラメータ係数を決定することを前提としている。一般に，次の4つの要素がモデル精度を決定する。

- ①モデルパラメータ
- ②モデル式
- ③パラメータ係数の決定方法
- ④重回帰分析に用いるサンプル

本研究では，多くの既存研究同様にモデル式には線形式を用い，パラメータ係数の算出には最小二乗法を用いる。モデルパラメータには次の4種類を使用する。

- (A)CPUの負荷率
- (B)無線による単位時間当りのデータ受信量（以下，無線受信量）
- (C)無線による単位時間当りのデータ送信量（以下，無線送信量）
- (D)ストレージへの単位時間当りのデータ書込み量+消費量

これらのパラメータは，消費電力に対して線形かつ大きな影響を与えることが予想できることを理由に選

択した。これら以外のパラメータも携帯端末の消費電力に影響を与えるが，本稿ではこれらを定数項として扱う。

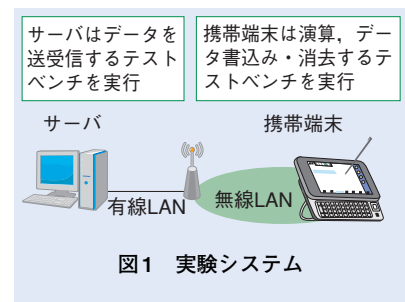
#### 3.2 テストベンチとサンプル取得

3.1節で述べた，重回帰分析に用いるサンプルを取得するため，実験システム（図1）と次の4種類のテストベンチを作成した。

- (a)端末の演算負荷を調整可能なテストベンチ
- (b)サーバが端末へ無線通信でデータを送信するテストベンチ
- (c)サーバが端末から無線通信でデータを受信するテストベンチ
- (d)端末のストレージへのデータ書込みと消去を行うテストベンチ

今回は，提案手法の妥当性の検証が目的であるため，実験システムにおける無線通信は，環境構築が容易な無線LAN環境下で行った。

これらのテストベンチa～dは，各々が対応するパラメータA～Dの値を意図的に変動させるものである。これにより，端末側で観測されるパラメータ値の変動が消費電力に与える影響を解析できる。CPUの負荷が消費電力に与える影響を解析す



\*2 重回帰分析法：1つの目的変数を複数の説明変数で表すための分析方法。  
 \*3 モデルフィッティング：ここでは，重回帰分析において目的変数を近似するモデル式を求めること。  
 \*4 最小二乗法：測定値との差の二乗和を最

小とするような推定値を求める方法。  
 \*5 テストベンチ：ここでは，モデル生成のための試験プログラムをいう。

際には、テストベンチaを端末上で単独実行させ、CPUの負荷率が高い/低いなどの任意状態におけるパラメータ値と消費電力値のサンプルを取得する。B、CおよびDのパラメータ値も、対応するテストベンチb、cおよびdにより独立に制御可能である。しかし、無線通信でのデータ送受信やストレージへのアクセスにはCPU稼働も伴うため、テストベンチb、c、dの単独実行から得られるサンプルでは、パラメータB、C、Dが単独で消費電力に与える影響を解析することはできない。これは、CPU負荷率と他のパラメータ間の相関が強い傾向が現れ、前述した多重共線性の問題が発生するためである。

よって、本提案手法では、テストベンチb、c、dを実行する際にテストベンチaも同時に実行することで、CPU負荷率の変動を抑え、パラメータ間の相関を低減することを可能にする[3]。

## 4. 消費電力モデル評価

### 4.1 対象システムと評価環境

実験対象の携帯端末にはNokia社のN810を使用した。N810は、無線LAN機能を内蔵し、LinuxベースのInternet Tablet OS 2008を搭載する携帯端末である。CPUにはOMAP<sup>®</sup>\*6 2420を、ストレージには256MBと2GBのNANDフラッシュメモリ\*7を使用している。モデルパラメータには、CPU負荷率、無線受信量、無線送信量、ストレージへの書込み・消費量を使用し、これらの値は/proc

ファイルシステム\*8から1秒間隔で取得する。電力計で計測した消費電力値に、3章で述べた方法によりモデルフィッティングさせることで、パラメータ係数を求める。パラメータ係数が得られるとモデルの生成が完了する。

任意の動作状態で/procファイルシステムから取得した前述の4種類のパラメータ値をモデルに入力することで、端末の消費電力を見積ることができ、消費電力の実測値との比較でモデルの精度評価を行った。評価には、MiBench\*9に含まれる7種類のベンチマークプログラムとwget\*10を評価用アプリケーションプログラムとして用いた。

### 4.2 モデルフィッティングの結果

テストベンチを用いてモデルを生成した結果、電力の測定値に対する平均誤差が0.6%の消費電力モデルを作成できた。なお、フィッティングに用いるサンプルは、テストベンチa、b、c、dの実行条件を変えて作成した9つのテストシナリオの下で取得した[3]。

9つのテストシナリオに対する消費電力の測定結果を折れ線グラフ、測定値にフィッティングさせたモデルによる消費電力見積り値を棒グラフとして図2に示す。線形モデルが測定値に良くフィットしていることが確認できる。9種類のテストシナリオを実行したときのパラメータ間の相関係数を表1に示す。一般的に、相関係数の絶対値が0.2前後であれば2変数間の相関はほとんどないといわれる。よって、表1に示す任意の2パラメータ間の相関は十分に小さいことが確認できる。提案するモデル生成手法に従って生成した消費電力モデルでは、多重共線性がモデル精度に与える負の影響は小さいと考えられる。

### 4.3 消費電力モデルの見積り精度評価

MiBenchを実行した際の消費電力の見積り結果を図3に示す。提案する消費電力モデルによる見積り値と測定値との誤差は平均4.9%で最大24%であった。ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation)を除くベンチマークでは、誤差が

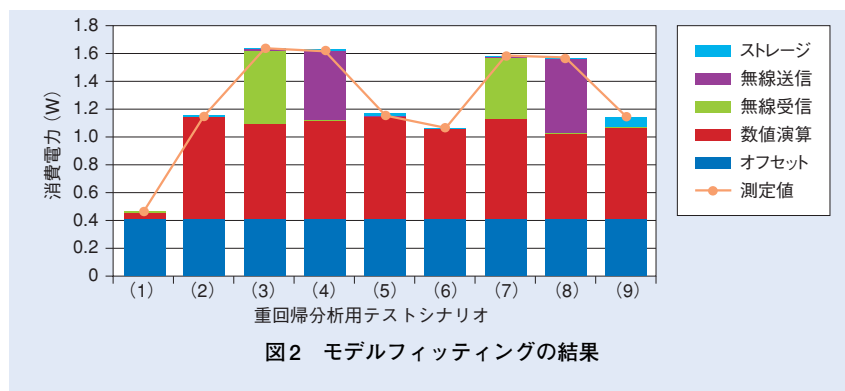


図2 モデルフィッティングの結果

\*6 OMAP<sup>®</sup>: OMAP<sup>®</sup>はTexas Instruments Inc.の登録商標。

\*7 NANDフラッシュメモリ: メモリカードメディアなどに広く応用されている不揮発性メモリの一種。

\*8 /procファイルシステム: Unix/Linux系OSにおける擬似ファイルシステムで、このディレクトリ以下でシステムのさまざまな動作状態を参照することができる。

\*9 MiBench: ミシガン大学で開発されたフリーの組込み向けベンチマーク集。

\*10 wget: HTTPなどに対応したダウンロードマネージャ。

表1 パラメータ間の相関係数

パラメータ1	パラメータ2	パラメータ1と2の相関係数r (-1≦r≦1)
CPU負荷率	無線受信量	0.213
CPU負荷率	無線送信量	0.104
CPU負荷率	ディスク書き込み量	0.136
無線受信量	無線送信量	-0.236
無線受信量	ディスク書き込み量	-0.260
無線送信量	ディスク書き込み量	-0.264

5%未満と非常に精度が良い。

wgetで国内外のサイトからファイルを取得する際の消費電力の測定値と見積り結果を図4に示す。4カ国のWebサイトからファイルを取得する実験を行った。ディレクトリ配下の全ファイル(gnu/freefont/およびgnu/gcc/)の取得と単一ファイル(gnu-0.2.tar.gz)の取得の両方のケースで評価した。なお、単一ファイル取得のみ九州大学・石原研究室内のサーバも利用して評価した。消費電力モデルによる見積り値と測定値の誤差は平均7.4%、最大16.9%であった。

なお、端末でのパラメータ取得処理が消費電力に与える影響を評価したところ、パラメータの値を/procファイルシステムから1秒おきに取得する処理で、消費する電力は48mWであった。これは、端末が待受時の消費電力の約12%に相当しており、端末の稼働時の消費電力と比べると、パラメータ取得処理の影響は非常に小さいといえる。

## 5. あとがき

本稿では、無線通信端末の消費電

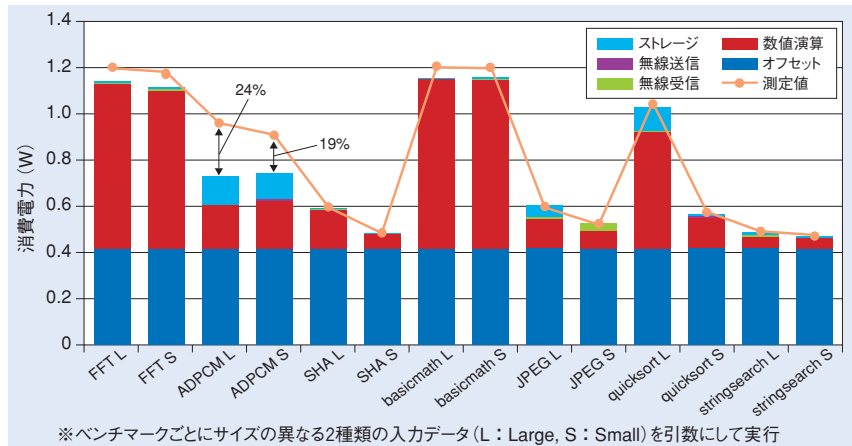


図3 MiBenchの消費電力見積り結果

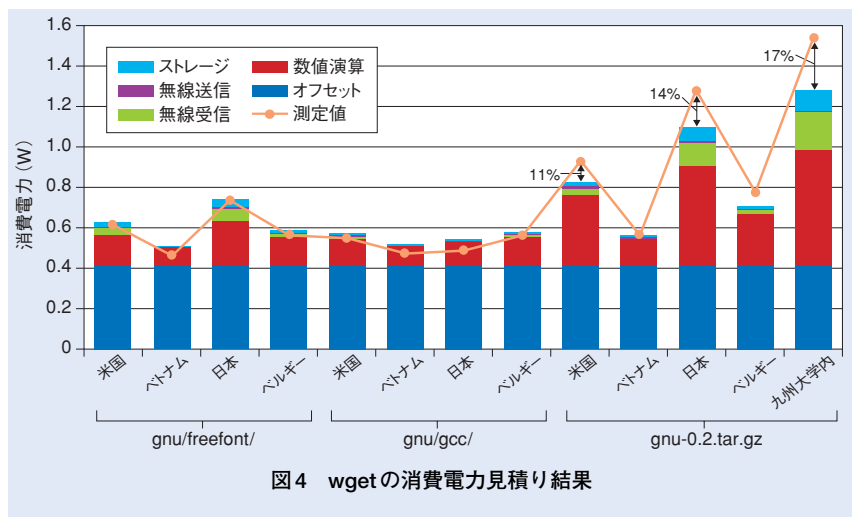


図4 wgetの消費電力見積り結果

力をOSレベルで取得可能な情報を用いて見積るモデルとそのモデルの生成手法を提案し、Nokia社の無線通信端末N810を用いて実現可能性を確認した。今後は、誤差の原因究明、他の端末での適応性評価を行う。また、他の通信機能やDSP (Digital Signal Processor) \*11など、今回は対象としなかった機能の消費電力モデルを生成し、端末全体に適応することも検討する予定である。

## 文献

- [1] D. Lee, T. Ishihara, M. Muroyama, H. Yasuura and F. Fallah: "An Energy Characterization Framework for Software-Based Embedded Systems," in Proc. of the 2006 IEEE/ACM/IFIP Workshop on ESTIMedia, pp.59-64, Oct. 2006.
- [2] F. E. Harrell: "Regression Modeling Strategies," Springer-Verlag, 2001.
- [3] 石原 亨, 奥平 拓見, 久住 憲嗣, 神山 剛, 関根 和寿, 片桐 雅二: "OSから解析可能な無線通信端末の消費電力モデルとその生成手法," 信学技報, CPSY2008-92, Mar.2009.

\* 11 DSP: 音声・画像など特定のデジタル信号処理に特化したマイクロプロセッサの総称。