

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330095

研究課題名(和文) スマートフォン・アプリケーション電力消費のモデルベース解析に関する研究

研究課題名(英文) Model-based Analysis of Energy Consumption in Smartphone Applications

研究代表者

中島 震 (Nakajima, Shin)

国立情報学研究所・情報社会相関研究系・教授

研究者番号：60350211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：電力消費はバッテリー駆動システムにおける代表的な機能外要求に関係する。バッテリー容量は小さいことから、長期間の作動を実現するには、電力消費を低減する必要がある。電力を消費する実体はハードウェア部品であるが、その部品を利用するアプリケーション・プログラムに不具合があると、予期しない量の電力が消費されてしまう。このような電力バグは、プログラム設計の欠陥に起因するので、開発上流工程で早期に除去したい。本研究課題は、電力消費のモデルベース解析の方法を検討する。重み付き時間オートマトンをベースとする形式モデルを用いることで、電力消費解析をロジック・モデル検査の問題に帰着できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Energy consumption is one of the primary non-functional concerns in systems equipped with batteries. The capacity of batteries is limited and reducing the consumption of battery power is mandatory for the systems to be long-lived. The hardware components consume the battery power directly. However, application programs are responsible for the energy consumption because they control the usage of the hardware components. If the programs have some hidden bugs in them, unexpected large amount of energy may be consumed. These energy bugs must be eliminated at early stages of developing application programs. We study a model-based analysis method of energy consumption behavior. Using a variant of weighted timed-automata as a rigorous model, we reduce the problem of detecting anomalies in the energy consumption behavior to logic model checking.

研究分野：ソフトウェア工学

キーワード：モデルベース開発 機能外要求 電力消費 モデル検査 ハイブリッドシステム スマートフォン

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレットといった携帯端末は私たちの日常生活で不可欠の道具となってきた。インターネットにつながり、「スマート」なサービスを楽しむ基盤である。気軽に持ち運べることを特徴とし、バッテリーから電力供給を受けるといった共通性を持つ。バッテリー容量は限定されており、充電しない限り、その電力提供能力は減少する。このような携帯端末システムの開発に際して、電力消費を抑えることが重要な課題になっている。

スマートフォンやタブレット向けに、新しいアプリケーション・プログラム（以下、アプリと呼ぶ）が開発されている。意図通りの機能振舞いを実現したアプリであっても、予想外に大きな電力消費を示すことがある。このようなアプリを実行すると、使用中のスマートフォンが熱くなる。バッテリー使用履歴を調べると残存容量が急激に減少していることに気づく。アプリ開発に際して、電力消費の不具合（電力バグ）を除去しなければならない。

電力バグの有無を調べるには、アプリを実行させて、使用電力量を監視すれば良い。この方法をプロファイラ・ベース方式と呼ぶ。電力消費は物理的な量で表現されるので、不具合がもしあれば、測定値の変化として現れる。消費電力を測定するもので、産業界で実践されている現実的な方法である。

一方、プロファイラ・ベース方式は、次のような問題を抱えている。(a)測定誤差の問題（電力バグによる余分な電力消費の絶対値が小さいと測定誤差に隠れる可能性がある）、(b)アプリ実行の問題（測定条件を変更すると不具合が顕在化するかもしれない）、(c)本質は設計の不具合（欠陥理由がライブラリの誤用であることが多い）等。

以上から、アプリ開発の上流工程で、設計の不具合に起因する電力バグを発見する方法の確立が重要な課題と認識されるようになってきた。

2. 研究の目的

本研究課題では、アプリ開発上流工程で作成する設計モデルを対象として、電力バグの有無を調べるモデル・ベース解析の方法を検討する。

特に、ソフトウェア自動検証の技術であるモデル検査法を応用したモデル・ベース解析の方法を確立することを目的として、アプリ等の電力消費振舞いを厳密に定義する方法、消費電力値に関わる数値制約性質を表現する方法、を新たに考案する。振舞いと性質を形式化することで、モデル検査法を応用することが可能になると期待できる。

また、不具合を持つことがわかった場合、その原因がアプリの機能振舞いの何処にあるかを調べる方法、つまり欠陥箇所特定の方法を考案する。

3. 研究の方法

以下の4つの観点から研究を進める。

(1) ソフトウェア基盤の調査

電力消費のモデル・ベース解析法を具体的に検討する対象として、情報入手が容易であって、広く使われているアンドロイド・スマートフォンを選ぶ。アンドロイドはリナックス上に構築されたソフトウェア基盤であって、アプリの開発と実行に必要な機能を提供する。アプリ開発の際に必要な情報は、インターネットから入手できる。これらを調べると、典型的な電力バグが次のような状況で起こることがわかる。

アンドロイド基盤は、積極的に電力節減を行い電池の消耗を抑える。ところが、電力節減モードへの移行をアプリから抑止したいことがある。アプリから、アンドロイド基盤が提供する電力管理ライブラリ機能を使用する。これらのライブラリ機能を使うことで、アプリの特徴に合わせたきめ細かい制御を実現できる。一方、ライブラリ機能の不適切な使い方によって、電力バグが混入する可能性が残る。このバグはアプリ開発者によるライブラリの誤用であって、設計の不具合である。開発上流で、このような不具合を発見し除去したい。

具体例として、アンドロイド基盤を調べ、電力管理に関わる機能を整理する。

(2) モデルの形式化

電力消費振舞いと検査性質の両面から厳密なモデルを形式化する。

① 電力消費振舞い

電力消費を引き起こす直接的な実体はハードウェア部品である。スマートフォンではWi-Fiによる無線通信を利用することが多い。また、Wi-Fiのハードウェアは、IEEEの802.11規格等によって、動作振舞いが規定されている。Wi-Fiの振舞い仕様を表現できるような電力消費振舞いの方法を検討する。

② 検査性質

使用時間が長くなると電力消費量も大きくなる。つまり、使用時間に対して単調増加関数である。素朴に、使用電力の上限値を超えないかを調べると、全く不具合がなくても、長い時間の経過後、その上限値を超えるだろう。したがって、使用電力に関わる制約条件は、別途、何らかの方法で指定した時間区間の中で調べることになる。区間の指定方法と使用電力の制約条件を、統一的に簡便に表現できる体系を検討する。

(3) 電力消費の解析手法

前項の厳密なモデルの形式化が得られると、振舞いが検査性質を満たすか否かを自動解析する方法を検討できるようになる。

① 幅優先探索

電力消費積算の問題を単純化して、初期状

態を電力消費 0 とし、別途与えた上限値が探索範囲内で超えるか否かを検査する方法を考える。アプリおよびハードウェア部品等の全体が作りだす状態遷移空間を、初期状態から幅優先探索し、上限値を超えるか否かを調べる。

② ロジック・モデル検査

検査性質を時相論理の式によって表現することに成功すると、電力消費振舞いから得られる構造をモデルとして、論理式が成り立つかを調べるモデル検査の問題に帰着することができる。このような時相論理の体系が複雑であれば、モデル検査問題が決定可能でなくなるだろう。決定可能でない場合は、何らかの近似的な解析法を工夫することになる。

(4) 欠陥箇所特定の方法

一般に不具合の有無を確認した後、不具合原因となった欠陥箇所を特定したい。欠陥が具体的に見つかれば、それを修正することは人手で行う。どのように修正すれば良いかは、設計仕様と関わる。ここで検討する欠陥箇所特定は、自動修正と異なる問題になる。

電力バグの問題についても、不具合がある場合、欠陥箇所を自動発見したい。我々が行った従来の研究成果から、検査対象の実行遷移列を論理式で表現できれば良いことがわかっている[参考文献 1]。そこで、電力消費振舞いの論理式表現を得ることに成功すれば、欠陥箇所の自動特定が可能になる。

[参考文献 1] S.-M. Lamraoui and S. Nakajima, A Formula-based Approach for Automatic Fault Localization of Imperative Programs, Proc. 16th International Conference on Formal Engineering Methods, 2014, pp. 251-266.

4. 研究成果

得られた研究成果を、第 3 節に示した 4 つの項目に対応して報告する。

(1) ソフトウェア基盤の調査

アンドロイド基盤上で作動するアプリは、イベント駆動スタイルのプログラムであって、決められたコールバック・メソッドが規定するライフサイクルにしたがう。公開情報を分析し、その設計情報を状態遷移マシンとして表現した。この状態遷移マシンを形式モデリング言語 Alloy によって厳密に書き表すことで、得られた設計情報が妥当であることを確認することができた(学会発表①)。

スマートフォンは消費電力を削減することを目的として、DVFS 機能を持つ省電力 CPU を搭載している。CPU 実行負荷が大きくなると動作周波数を速くする。電力消費が大きくなる反面、実行速度が向上する。逆に、実行負荷が小さい時は低い周波数で作動させて電力消費をおさえる。つまり、DVFS によって

消費電力が影響を受ける。そこで、実行負荷の変化が動作周波数ならびに消費電力に与える影響を調べるアプリを作成し評価した。その結果、消費電力に対する DVFS による変動が約 30% 程度の影響があることがわかった。つまり、プロファイル方式による実測では、CPU 実行負荷の影響があると、たとえ電力バグがあったとしても、その定量的な影響が 30% 以下の場合、測定値の変動に隠れてしまうことになる。その結果、正確な検査ができないことがわかる(雑誌論文⑤)。モデル・ベース方式研究の意義を確認することができた。

(2) モデルの形式化

① 電力消費振舞い

前項で導入したアプリの状態遷移マシンは離散遷移で書き表すことができる。一方、本研究の対象である Wi-Fi のようなハードウェア部品は状態遷移マシンの考え方に加えて、次の 2 点を考慮する必要がある。(a) 電力消費量は使用している時間に対して単調増加である、(b) 単位時間あたりの電力消費量は状態に依存して異なる。さらに、Wi-Fi の電力消費プロファイルから、Wi-Fi は 4 つの状態からなること、状態ごとに単位時間あたりの電力消費量を定数として近似できること、がわかった。以上から、ハードウェア部品の電力消費振舞いをモデル化する方法として重み付き時間オートマトンを採用した。重みによって消費電力の積算値を表現するというアイデアに基づく。

アプリならびにハードウェア部品の双方を表現可能とする新しいモデル PCA を、重み付き時間オートマトンを参考に定義した。

② 検査性質

消費電力に関わる性質は、2 つの観点の組合せとして表すことができる。(a) 検査対象の時間区間を指定する方法、(b) 指定区間で消費した電力量に対する数値制約条件を表現する方法、である。

(a) については、時間オートマトンの性質表現と同様に、時間概念を考慮した時相論理を用いるのが自然である。一方、(b) を表現する際には、検査区間の開始点と終了点での電力消費積算値の差(重みの差)を計算する。このような「ある時点での」重みを保存できなければならない。そこで、Alur たちが時間オートマトンに対して導入した凍結限量子付きの時相論理を拡張して fWTL を新たに定義した。fWTL の凍結限量子は、時間ならびに重み(つまり電力消費量)を読み出すことができる。

以上、電力消費振舞いならびに検査性質に対して、厳密な形式定義を得ることができた(雑誌論文⑥)。

(3) 電力消費の解析手法

前項の形式モデルで表現した電力消費振舞いの自動検査として 2 つの方法を試みた。

これらの実験では、時間概念と連続変数の双方を表現可能な Real-Time Maude を用いた (雑誌論文⑦)。

① 幅優先探索

初期状態を検査区間の開始点とする場合に有効な解析法である。電力消費量が上限値を超えないという性質が成り立つか検査する。初期状態から少ない遷移ステップ数で到達可能な浅い状態に対して、与えた検査条件が壊れているかを調べる。Real-Time Maude の幅優先探索戦略を採用することで、この問題を解くことが可能になる。アプリ、基盤の抽象化、Wi-Fi 等を独立な PCA として表現し、全体を並列結合した記述について実験した結果、期待通りの解析結果が得られることを確認した (雑誌論文③)。

② ロジック・モデル検査

電力消費問題は、PCA による振舞い記述が、性質を表現する fWLTL 式を満たすかを調べるモデル検査問題に帰着できる。ところが、計算可能性の観点からの技術的な問題が生じる。時間オートマトンに対する凍結限量子つき時相論理式のモデル検査問題は決定不能であることがわかっていた。一方、PCA は時間オートマトンの拡張であり、また、fWLTL は凍結限量子つき時相論理の拡張である。したがって、本研究課題で定式化した電力消費解析のモデル検査問題は計算可能性の議論で決定不能である (学会発表③④)。

電力消費問題は、有限の時間区間での検査で行うことから、上記に述べた一般のモデル検査問題を制限してもよい。そこで、検査論理式の形を制限することによって、過大近似による解析を実施する方法を着想した。Real-Time Maude の LTL モデル検査機能を用いる実験を通して、提案方法が実現可能であることを論じた (雑誌論文④)。

(4) 欠陥箇所特定の方法

第3節で引用した既存研究 (参考文献 1) の方法では、欠陥箇所特定対象の遷移可能系列を論理式で表現するスコープ有界解析を基本としている。そこで、PCA に対して遷移可能列の論理式 (トレース論理式と呼ぶ) を定義する方法を検討する。PCA が時間オートマトンの拡張であることを利用して、Sorea が提案した時間オートマトンの表現方法を参考にした。

PCA で表したモデルが検査性質を満たさない時、PCA と検査性質の全体を連言でつないだ大きな論理式は偽となる。欠陥箇所特定の方法は、偽となる論理式から最大除去集合を求めることで実現する。つまり、それを除去した論理式を真とするような部分式である。欠陥箇所は最大除去集合に含まれる。

最大除去集合を求めることが可能な SMT ソルバー Yices を用いた実験によって、不具合のある対象から欠陥の理由となる状態遷移エッジを自動発見することができた (雑誌論文②)。

最後に、(1) から (4) までの総合報告を雑誌論文①として公表した。

本研究課題で得られた成果は、雑誌論文 (モノグラフ掲載、国際学会予稿集を含む) 7 件・学会発表 (口頭発表) 10 件として公表され、モデル・ベース電力消費解析に関わる研究として、国内外から高い評価を受けた。具体的には、形式手法分野のトップ・コンファレンスでの論文採択 (雑誌論文④)、情報処理学会山下記念研究賞の受賞 (学会発表③)、組込みシステムシンポジウムにおける招待講演 (学会発表②) をあげることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① S. Nakajima, Model-based Analysis of Energy Consumption Behavior, Trustworthy Cyber-Physical Systems Engineering, 査読有、2016, pp. 271-305
- ② S. Nakajima and S.-M. Lamraoui, Fault Localization of Energy Consumption Behavior using Maximum Satisfiability, Proc. 5th International Workshop of Design, Modeling and Evaluation of Cyber Physical Systems, 査読有、2015, pp. 99-115
- ③ S. Nakajima, Formal Analysis of Android Application Behavior with Real-Time Maude, Proc. 3rd International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, 査読有、2015, pp. 7-12
- ④ S. Nakajima, Using Real-Time Maude to Model Check Energy Consumption Behavior, Proc. 20th International Symposium on Formal Methods, 査読有、2015, pp. 378-394
- ⑤ S. Nakajima and M. Toyoshima, Behavioral Contracts for Energy Consumption, Ada User Journal, 査読有、Vol. 35, 2014, pp. 266-271
- ⑥ S. Nakajima, Model Checking of Energy Consumption Behavior, Proc. 1st International Conference on Complex Systems Design and Management, 査読有、2014, pp. 3-14
- ⑦ S. Nakajima, Everlasting Challenges with the OBJ Language Family, Specification, Algebra, and Software, 査読有、2014, pp. 478-493

[学会発表] (計 10 件)

- ① S. Nakajima, Analyzing Lifecycle Behavior of Android Application Components, 1st International

Workshop on Dependable Software and Applications、2015年7月5日、台中（台湾）

- ② 中島震、スマートタブレットの省電力、組込みシステムシンポジウム2014（招待講演）、2014年10月22日、国立オリンピック記念青少年センター（東京都）
- ③ 中島震、電力消費振る舞いのロジック・モデル検査、第34回組込みシステム研究会、2014年9月17日、札幌市男女共同参画センター（北海道・札幌市）
- ④ S. Nakajima、Using Linear Temporal Logic with Freeze Quantifier in Model-based Analysis of Energy Consumption、2nd IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications、2014年8月25日、香港（中国）

（その他の発表6件）

〔その他〕

ホームページ

<http://researchmap.jp/nkjm/>

受賞

情報処理学会 2015年度山下記念研究賞、
中島震、2015年10月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 震 (NAKAJIMA, Shin)

国立情報学研究所・情報社会相関研究系・
教授

研究者番号：60350211