

マイクロ波給電を応用した スマートフォンの外付け電源管理システム

高木 雅^{1,a)} 池内 尚史^{1,b)} 角谷 和宣^{1,c)} 川原 圭博^{1,d)}

受付日 2017年12月22日, 採録日 2018年7月10日

概要: 安価なスマートフォンや中古スマートフォンは無線センサノードとして高いポテンシャルを秘めている。しかしながら、電池駆動時間の厳しい制約ゆえに、特に商用電源の利用できない環境では、センシング活動において重要な役割を果たすことは困難であった。可能であればスマートフォンを使わない間は電源オフ状態で待機させておくことが望ましいが、必要に応じてスマートフォンを電源オフ状態から復帰させる手段がなかった。そこで本稿では、外付け電源管理システム「WakeDroid」を提案し、スマートフォンをノーマリーオフのセンサノードとして利用可能とする。Android OSにはバッテリーの充電管理ソフトウェアが搭載されており、スマートフォンを充電器に接続すると自動的に起動する。我々はこのソフトウェアを改変することで、必要に応じてスマートフォンを電源オフ状態から起動させることを可能とする。WakeDroidのUSBドングルにはマイクロ波給電用のアンテナと整流回路が搭載されており、ユーザはスマートフォンのUSB端子にドングルを差し込むだけで利用できる。スマートフォンのハードウェアを改変する必要はない。このUSBドングルを用いることで、複数のスマートフォンを同時に、あるいは、選択的に起動させることができる。0.48 Wのマイクロ波給電源から30 m以内にあるスマートフォンを起動できる。WakeDroidは中古スマートフォンに低コストなセンサノードとしての「第二の人生」を与えることで、スマートフォンセンシングのコンセプトを大幅に拡張する。

キーワード: スマートフォン, オンデマンド, センシング, 電源管理, 遠隔操作

External Power Management System for Smartphones Applying Microwave Power Supply

MASARU TAKAGI^{1,a)} TAKASHI IKEUCHI^{1,b)} KAZUNOBU SUMIYA^{1,c)} YOSHIHIRO KAWAHARA^{1,d)}

Received: December 22, 2017, Accepted: July 10, 2018

Abstract: Cheap or used smartphones have a good potential as wireless sensor nodes. However, the relatively short battery life has prevented smartphones from playing an important role in sensing applications, especially in remote areas without commercial power supply. Although it is desirable to keep smartphones in the power-off state when not used, smartphones have no means of waking up from this power-off state. In this paper, we propose WakeDroid, an external power manager for converting normally-off smartphones to dedicated sensor nodes. The Android OS has battery charge management software that starts up automatically when connected to a charger. WakeDroid hacks this software to “kick-start” smartphones from the power-off state on demand. Users just need to plug a WakeDroid USB dongle, consisting of an antenna and a rectifier for microwave power transmission, to the USB charging port of the smartphone. No hardware modification on the smartphone is required. The rectenna USB dongle allows simultaneous or selective booting of multiple smartphones at the same time. WakeDroid can boot smartphones within 30 m from a 0.48 W transmitter. WakeDroid drastically widens the concept of smartphone sensing by giving used smartphones “second life” as low-cost sensor nodes.

Keywords: smartphone, on-demand, sensing, power management, remote control

¹ 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

a) takagi@akg.t.u-tokyo.ac.jp

b) ikeuchi@akg.t.u-tokyo.ac.jp

c) sumiya@akg.t.u-tokyo.ac.jp

d) kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

1. まえがき

スマートフォンは我々の生活に欠かせない便利な存在であるが、携帯電話の回線契約と一体化した販売形態ゆえに、製品寿命に比して買い替えサイクルが短い。2012年以降、全世界で累計60億台ものスマートフォンが出荷されており、買い替えサイクルを平均2年と仮定すると、30億台以上のスマートフォンがすでに廃棄されたか、または、机の引き出しの中に眠っている計算になる。1台あたり100g強のスマートフォンであっても、積み上げれば30万トン以上の廃棄物となり、6,000トン以上のレアメタルが含まれる。他方で、内閣府の消費動向調査によると、スマートフォンを含む携帯電話機の買い替え理由のうち故障は40%弱であり、60%強は依然としてスマートフォンの機能を有している。またMM総研によると、故障したスマートフォンのうち水没や基盤故障など致命的な問題をかかえるものは半数程度で、中古スマートフォンの多くには利用価値がある [1]。

低価格でロバストなセンサノードはユビキタスコンピューティングの実現に不可欠である。Telosのような専用センサノードは廉価であるが、機能や性能に厳しい制約があり信号処理などの用途には適さない [2]。一般に、電子機器の調達コストを低減させるにあたり最も有効な手段は、大量生産された汎用的な製品を使うことであり、スマートフォンはこのような汎用製品の代表格である。ほとんどのスマートフォンは、カメラやマイク、加速度センサなどの高品質なセンサを搭載しており、防水筐体を備えるものも珍しくない。Wi-FiとBluetooth、GPS、3G通信など最低限の機能を備えたスマートフォンの小売価格は、定期契約なしでも10ドル台まで低下している。たとえば、スマートフォンとしてはCPU性能が低く、RAMやストレージの容量が少ないとしても、無線センサノードとしては十分に高性能である。携帯電話回線の月額料金についても低廉化が進んでおり、米国のある携帯電話事業者は月額3ドルで30分の無料通話と30通の無料SMSを提供している。また、極端な例では、月額料金なしで500MBのパケット通信を提供する事業者も存在する。さらに、IoT機器に特化した事業者も出現しており、ごく低速ながら低価格で通信可能なSIMカードを大量調達できる。

これまでも、スマートフォンを様々なセンサデータを集約するためのハブとして利用する検討が数多くなされてきた [3], [4]。高度に発達した携帯電話網のおかげで、スマートフォンを用いたセンシングシステムを農村地域や森林地帯に導入することが理論上は可能であるが、電池駆動時間の厳しい制約がネックとなり実用性は乏しい。従来のスマートフォンセンシングに関する提案では、対象のスマートフォンがユーザによって毎日充電されることを暗黙の前提としてきた。しかしながら、中古スマートフォンを

センシング専用機器として利用する場合には、充電や電池交換のコストはけっして無視できず、SIMカードや端末自体の調達コストを上回る恐れすらある。したがって、スマートフォンの電池駆動時間の制約を解消することは、商用電源を利用できない野外でのセンシング活動の新しい可能性を開く重要な鍵となる。

本稿では、特に商用電源の利用しにくい環境において専用センサノードとして稼働するスマートフォン向けに、外付け電源管理システム「WakeDroid」を提案する。WakeDroidは、Androidスマートフォンを充電器に接続した際に自動的に起動する電源状態管理ソフトウェアを拡張し、USB端子に接続するUSB Dongle型デバイスとして電源管理機能を実現する。WakeDroidのUSB Dongleは、無線電力伝送のためのアンテナと整流回路を備え、遠隔操作によるAndroidスマートフォンの電源投入を実現する。このようにオンデマンドでのスマートフォンの電源投入を実現することで、スマートフォンを電源オフ状態で待機させることを可能とし、センシング活動における電池駆動時間の厳しい制約を大きく緩和する。また、WakeDroidは中古スマートフォンにセンサノードとしての「第二の人生」を与え、既存製品の再利用を促すことで、導入時の費用と環境負荷を低減させる。さらに、従来の専用センサノードでは実現が困難であった、音声や動画といったリッチコンテンツの取扱い、カメラとタッチパネルを用いたユーザインタラクション、GPSを必要としない超低消費電力なジオフェンスといった多彩な機能を、待機電力なしで利用可能とする。

本稿の構成は以下のとおりである。まず2章で、WakeDroidを支える4つの要素技術を紹介し、次に3章で、2つの典型的な応用例を交えて適用対象の広さを実証する。さらに4章で、スマートフォンの機種依存や無線信号の飛距離について議論した後、5章で関連研究を紹介し、6章で本稿の内容をまとめる。

2. 要素技術

図1にWakeDroidの概要を示す。WakeDroidは、マイクロ波給電源、USB Dongle、対象のスマートフォンの3つの要素から構成される。これら3つの要素が協調するこ

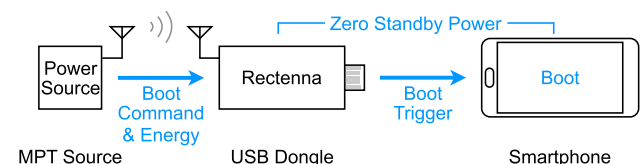


図1 提案するフレームワークの概要。WakeDroidのUSB Dongleを用いることで、スマートフォンの起動プロセスを遠隔操作で開始させることが可能となる

Fig. 1 Overview of the proposed framework. WakeDroid USB dongle enables us to trigger the boot procedure of target smartphones remotely.

とで前章で述べたジオフェンスなどの多彩な機能を待機電力なしでオンデマンドに利用可能とする。WakeDroidは以下の4つの要素技術から構成される。

2.1 USB 給電による起動トリガ

4つの要素技術の中でとりわけ重要な技術は、スマートフォンのUSB端子を刺激することで対象のスマートフォンを電源オフ状態から起動させる技術である。Android端末にはバッテリー充電中の電源状態管理のためのソフトウェアが備わっており、電池残量が著しく少ない場合を除けば、端末に充電器が接続されると自動的に起動する。このソフトウェアはLinuxカーネル上で動作するものであり、そのソースコードはAndroid Open Source Project (AOSP)内の/system/core/charger/charger.cとして公開されている。本手法では、この電源状態管理ソフトウェアを改変することで、USB端子に外部から給電されたときに、内蔵バッテリーの充電ではなく、Android OSの起動プロセスを開始させる。同様の自動起動機能はAndroid OS標準のブートローダにも備わっているが、この機能はAndroid OSのリファレンスモデルであるNexus/Pixelシリーズでしか利用できない。これとは対照的に、我々の手法は後に4.1節で詳細を述べるように、事実上あらゆるAndroid端末に適用が可能である。なお、本手法で変更するのは電源オフ状態でのUSB給電時の挙動のみであり、電源オン状態での給電時には従来どおり内蔵バッテリーの充電を行う。

我々は、Android OSのリファレンスモデル7機種を用いて、起動トリガに必要なUSB端子への印加電圧と必要となるエネルギー量を計測した。具体的な機種名をあげると、Nexus S, Galaxy Nexus, Nexus 4, Nexus 5, Nexus 6, Nexus 5X, Nexus 6Pの7機種である。計測実験では、スマートフォンのUSB端子にソースメータ(Keithley SMU 2450)を接続し、印加電圧と印加時間を調整してスマートフォンが起動する最低限度を調べ、その際にソースメータから供給したエネルギー量を計測した。表1に示したように、起動トリガに必要な最低電圧は機種により異なる。この差異は、ロジックボード上に実装された電源管理IC

表1 Android OSのリファレンスモデル7機種における、USB端子からの起動トリガに必要な電圧とエネルギー量

Table 1 The voltage and the total energy needed for boot trigger using seven reference models of the Android OS.

Model	OS	Voltage	Energy
Nexus S	4.1.2	3.76 V	0.9 mW · s
Galaxy Nexus	4.3	4.00 V	20.9 mW · s
Nexus 4	5.1.1	3.92 V	0.3 mW · s
Nexus 5	4.4.4	4.23 V	0.4 mW · s
Nexus 6	6.0	4.54 V	639 mW · s
Nexus 5X	7.0	2.80 V	0.05 mW · s
Nexus 6P	7.0	2.81 V	0.04 mW · s

の違いに起因するものであるが、世界最大のスマートフォン向けCPUベンダであるQualcommはCPUと電源管理ICをセットで提供しているため、CPU型番が同じスマートフォンでは必要な電圧値も同程度となる。必要なエネルギー量は機種により大きく異なるが、必要な印加時間がたかだか1秒と短く、おおむねミリジュールのオーダーに収まるため、無線給電やボタン電池で十分に給電可能である。

2.2 マイクロ波給電による無線起動トリガ

この節では、遠隔操作でスマートフォンの電源投入を可能とするUSBドングル型デバイスを紹介する。この外付けドングルは、低消費電力であるだけでなく、対象のスマートフォンに十分な電圧を供給できる必要がある。また、可能な限り低コストでありつつ、指定したスマートフォンを選択的に起動できる能力が求められる。これらの要件を満たすため、ここでは915 MHz帯のマイクロ波給電技術を応用して、無線信号による起動トリガを実現する方式を提案する。この方式のユニークな点は、USBドングル自身が無線給電により駆動され、USBドングルに内蔵電池が不要な点である。

我々は、図2に示すように、SMA端子、整流回路、1 mFのキャパシタ、USB端子を搭載したUSBドングルを実装した。このUSBドングルは、マイクロ波給電からの電波をアンテナで受信し、整流して取り出したエネルギーをキャパシタに蓄える*1。キャパシタの電圧が規定値(1.25 V)を超えると、電圧が規定値(1.02 V)を下回るまでの間キャパシタに蓄えたエネルギーを取り出し、これを5 Vに昇圧してUSB端子に印加する。整流昇圧および電源管理の機能はPowercast P2110Bを用いて実装しており、整流回路の変換効率は入力3 dBmのときに60%超であった[5]。

無線電力伝送にはいくつかの方式が存在するが、本研究でマイクロ波方式を採用したのは、アンテナと送信電力を変更することで到達範囲を制御しやすいことに加え、既存の高出力RFIDリーダやWi-Fiルータで給電源を代用できるという利点もあるためである。マイクロ波方式の欠点

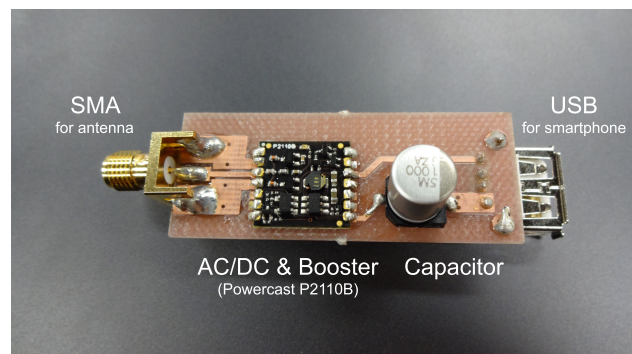


図2 無線起動トリガのためのレクテナ USB ドングル
Fig. 2 Rectenna USB dongle for wireless boot trigger.

*1 必要となる最低の入力電力は -14 dBm (= 0.04 mW) である。

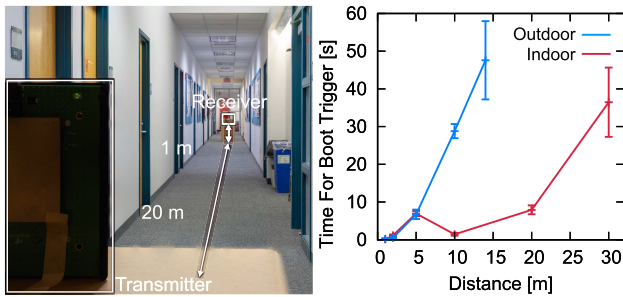


図 3 (左) 屋内での到達距離の計測環境, (右) 送電距離と起動トリガの所要時間の関係

Fig. 3 (Left) The measurement environment indoor, (Right) The relationship between the distance and the necessary time for boot trigger.

は、同じ周波数帯を用いる無線通信と干渉することであるが、無線給電と無線通信を両立する技術は SWIPT と呼ばれており広く研究されている。周波数帯と送信出力、到達距離については、後に 4.2 節で詳しく議論する。

ここでは、Nexus 5X と Powercast 給電キットを用いて、無線起動トリガ信号の到達距離の計測を行った [5]。実験に用いた給電機は約 20 cm 四方の板型で正面方向への指向性を持ち、出力されるマイクロ波には給電機の ID 情報が数秒ごとにオンオフ変調で埋め込まれる。送信周波数は 915 MHz、送信電力は送信アンテナ利得 (8 dBi) を除いて 0.48 W とした。なお、実験は Carnegie Mellon 大学の Newell-Simon Hall の正面玄関前と 3612 号室前の廊下で実施した。図 3 に、送電距離と起動トリガの所要時間の関係を示す。屋内では、マイクロ波給電機から 2m 以内にあるスマートフォンをほぼ瞬時に、30m 以内にあるスマートフォンを 1 分以内に起動させることが可能である。しかしながら、送電距離が長くなるにつれ、電波強度が不安定となるため所要時間のバラつきが大きくなる。送信電力を向上させた場合の送電距離の限界については、後に 4.2 節で詳しく議論するが、送電距離については改善の余地がある。

2.3 マイクロ波給電による選択的な無線起動トリガ

前節で紹介した無線起動トリガ技術では、電波の到達範囲内にあるすべてのスマートフォンに対して一括で起動プロセスの開始を促すことができたが、特定のスマートフォンを指定して起動できれば活用の幅が広がる。そこで我々は、前述の電源状態管理ソフトウェアにさらなる変更を加えてマイクロ波を変調し ID 情報を埋め込むことで、給電側で指定した機種種のスマートフォンのみを選択的に起動する機構を提案する。この機構により、指定された機種種のスマートフォン以外では、受信した電力を内蔵バッテリーの充電に充てることが可能となる。マイクロ波給電方式で伝送できる電力は、スマートフォンを常時起動させておくには少なすぎるものの、スマートフォンが電源オフ状態であれば電力を少しずつバッテリーに蓄えることが可能である。本

表 2 各機種で認識可能な最短のオン/オフのシンボルの長さ
Table 2 The minimum length of the ON/OFF keying symbol that can be detected by each smartphone model.

Model	OS	“ON” Symbol	“OFF” Symbol
Nexus S	4.1.2	570 ms	2 ms
Galaxy Nexus	4.3	570 ms	4 ms
Nexus 4	5.1.1	230 ms	4 ms
Nexus 5	4.4.4	330 ms	7 ms
Nexus 6	6.0	350 ms	25 ms
Nexus 5X	7.0	1,150 ms	22 ms
Nexus 6P	7.0	900 ms	21 ms

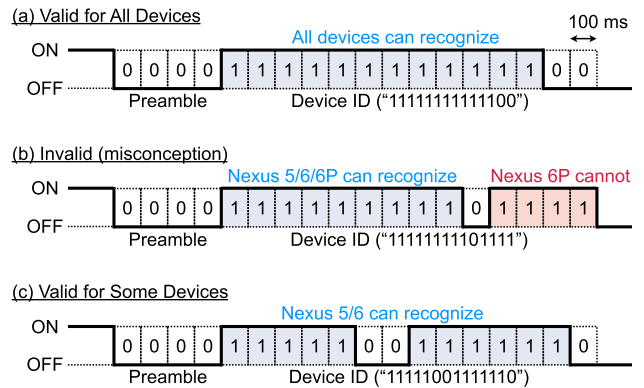


図 4 選択的起動トリガを実現するオンオフ変調方式

Fig. 4 The modulation for selective boot trigger is based on ON/OFF keying.

機構の設計にあたり、以下の 5 つの要件を設定した。

- 要件 1: マイクロ波給電機の修正が最小限であること。
- 要件 2: ID を幅広いスマートフォンで認識可能であること。
- 要件 3: 端末の収容台数に応じて ID 長を柔軟に変更できること。
- 要件 4: 給電停止時間が最小限であること。
- 要件 5: 複数の端末を一括して指定できること。

要件 1 を満たしつつ、受信側の USB ドングルを可能な限りシンプルな構成とするため、変調方式としては単純なオンオフ変調を採用した。Bluetooth や ZigBee といった近距離無線通信規格を用いる場合と比べて、我々の方式では受信機の製造コストを最小限に抑えられる。また、スマートフォン側に特別なハードウェアは必要なく、電源状態管理ソフトウェアが給電のオンオフパターンを監視し、給電側で埋め込まれた ID を読み取る。要件 2 に関する予備実験により、認識可能なシンボル長はスマートフォンの機種により異なることが明らかとなった (表 2)。この差異は、USB 端子からの給電電圧を安定させるためのキャパシタの大きさに起因するものと考えられる。最も反応の遅い端末に合わせたスロット長では、送達時間が長くなりすぎるため、ここではオフ状態の認識下限時間を基準に余裕を持たせてスロット長を 100 ms に設定し、受信側の端末で認識可能な ID パターンのみを割り当てることとした (図 4)。こ

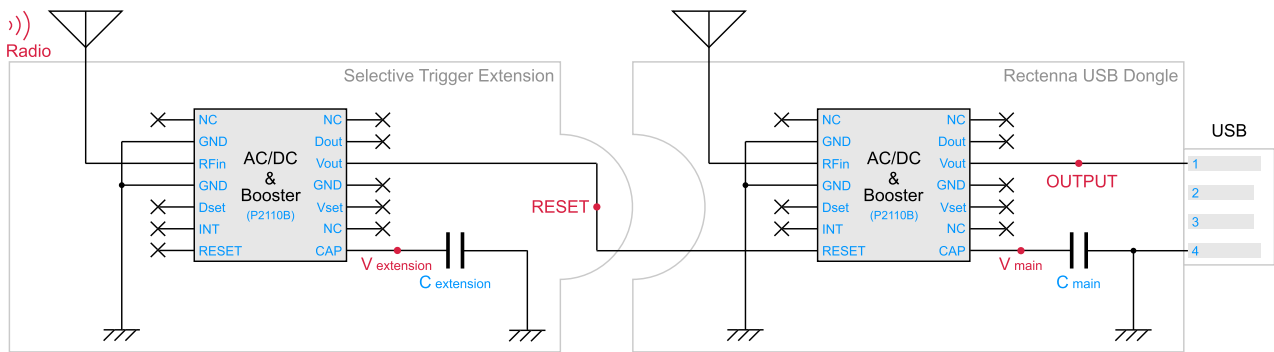


図 5 選択的起動のための拡張モジュール (左) とレクテナ USB ドングル (右) の回路図
 Fig. 5 Circuit diagram of the extension module for selective boot trigger (left) and the rectenna USB dongle (right).

の ID 割当てにおいては、どの端末でも認識ミスが生じないように十分な給電継続時間を持つ ID パターンを選ぶだけでなく、指定外の端末を充電できるように合計の給電時間も考慮する (要件 3, 4)。また、要件 5 を満たすため、IP マルチキャストグループに相当するグループ ID を導入した。

このようなデバイス選択ロジックを実装するにあたり問題となるのは、給電波のオンオフが対象のスマートフォンに直接伝わらない点である。すなわち、USB ドングル内で整流された電力が一時的にキャパシタに蓄えられ、直接 USB 端子に印加されないために、スマートフォン側では給電波のオンオフを直接検知できないのである。この問題を解決するため、我々は選択的起動を実現するための拡張モジュールを開発した (図 5 左)。このモジュールは、それを取り付ける先の USB ドングルとよく似ているが、キャパシタの容量を小さくすることで入力への応答性を高めている。出力は、USB ドングルのリセットピンに接続されており、USB ドングルの出力を制御する。具体例をあげて動作を説明すると、無線信号があるときには、拡張モジュールの出力が High になり、USB ドングルの出力は抑制されてキャパシタに電荷を蓄える。一方、無線信号がないときには、拡張モジュールの出力は Low となり、USB ドングルはキャパシタに蓄えた電荷を放出し USB 端子に電圧を印加する (図 6)。拡張モジュールのキャパシタを十分に小さく設計するならば、出力のスイッチング遅延時間 (t_c , t_d) は短く、タイムスロット T と比べて無視できる水準となる。他方で、キャパシタの放電継続時間も短くなるため、給電オフ状態が長く続かないよう ID パターンを設計する必要がある。この条件を満たす限り、給電の有無によって USB ドングルの出力をほぼ直接的に制御可能であり、マイクロ波給電源をスイッチングすることで、USB 端子への電圧印加をオンオフ変調できる。

2.4 Android アプリの高速起動

スマートフォンを間欠駆動させる場合、利用のたびに OS のブートおよびシャットダウンが必要となる。これら

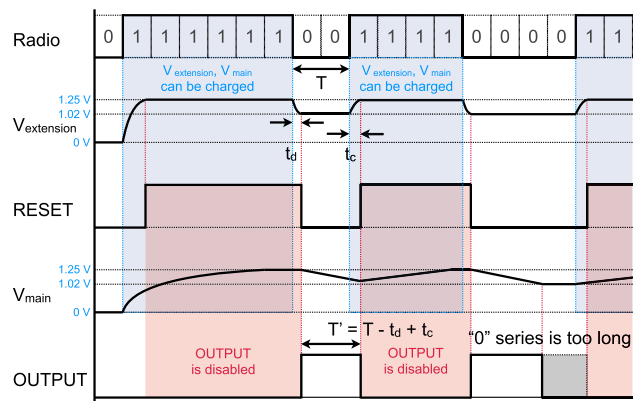


図 6 選択的起動を行うためのオンオフ変調のタイミング・ダイアグラム
 Fig. 6 Timing diagram of the selective boot trigger extension.

の過程における電力消費は、常時稼働させる場合には生じないものであり、本稿ではこの電力消費の差分を電力的オーバーヘッドと定義する。Android OS の起動プロセスを短縮することは、電力的オーバーヘッドを削減し、電池寿命を向上させるために重要である。そこで我々は、起動トリガから Android アプリとして実装されたセンシングロジックの実行開始までの所要時間を短縮する技術についても開発を行った。Android OS には、OS の起動完了や電池残量の低下といった端末上の重要なイベントを、端末上の全アプリに通知する Broadcast Intent という仕組みが備わっている。OS の起動完了時には BOOT_COMPLETED という名前の Broadcast Intent が配信され、バックグラウンドで常駐するアプリが起動する重要な契機となっている。しかしながら、BOOT_COMPLETED の Broadcast intent は、OS 起動直後にアプリを実行するための最適な手段でないことが我々の調査により明らかとなった。より具体的には、BOOT_COMPLETED の Broadcast intent に先んじて、ホーム画面として設定されているアプリが起動されることが判明した。

表 3 は、Android OS の種々のディストリビューション、OS バージョンにおける、電源投入から BOOT_COMPLETED

表 3 Android OS の種々のディストリビューションを実行する Nexus 5 における、電源投入からセンシングアプリ起動までの所要時間の比較

Table 3 Comparison of the necessary times from the boot trigger to the launch of the sensing app on various custom Android OSs for Nexus 5.

Distribution	OS	Home Screen	BOOT_COMPLETED
AOSP (Pure Android)	4.4	22 s	40 s
	5.0	30 s	39 s
	5.1	29 s	36 s
	6.0	35 s	42 s
CyanogenMod	4.4	24 s	27 s
	5.1	26 s	32 s
	6.0	33 s	39 s
SlimROM	4.4	23 s	36 s
	6.0	30 s	42 s

の Broadcast intent 配信まで、または、電源投入からホーム画面アプリの実行までの所要時間をまとめたものである。Android OS のユーザインタフェースは、ホーム画面も含めて Android アプリとして実装されており、アプリ開発者は独自のホーム画面を作成できる。したがって、センシングアプリをホーム画面として実装することで起動タイミングを早められる。なお、この際に必ずしも一般的なホーム画面としての機能をすべて実装する必要はない。この発見により、Google 純正の Android 4.4 を実行する Nexus 5 では、OS の起動時間を実質的に 18 秒短縮し、電源投入 1 回あたり 13.7 W・s のエネルギーを節約できる。また、Android 4.4 が Android 5.x や 6.x より軽量であり、起動プロセスが短いことも実験で確認された。これは、Android 4.4 が、発展途上国に多く見られる安価で低機能のデバイスをサポートするために設計されたバージョンであることと符合する。起動プロセスの長さは間欠駆動時の消費電力に直結する重要な要素であるため、我々はプロトタイプ実装において可能な限り Android 4.4 を採用することとした。

3. 応用例

WakeDroid は、中古スマートフォンに専用センサノードとしての「第二の人生」を与えることで、個人や零細企業の草の根的なセンシング活動を支援することを目標としている。したがって、我々が想定するユーザは、個人や予算の限られた零細企業、地方自治体、非営利団体、ボランティア団体などである。WakeDroid は幅広い用途に利用できるよう設計されており、本章では、WakeDroid と組み合わせることで中古スマートフォンの残存能力を有効活用できる 2 つの典型的な利用シナリオを紹介する。

3.1 オンデマンド：乳幼児や高齢者の遠隔見守り

留守番中の乳幼児やペット、独り暮らしの高齢者を遠隔から見守るシステムには幅広い需要がある。特に高齢者に

については、持病の発作や転倒による骨折を素早く検知することが人命救助の観点からも重要である。しかしながら、警備業者が提供する商用サービスは必ずしも安価ではなく、プライバシー面の懸念もあって利用をためらう人が少なくない。ここで求められる要件は、低コストで、プライバシーに配慮しつつ、遠隔地の家族がオンデマンドで利用できることである。そこで、我々は中古スマートフォンと WakeDroid を組み合わせた遠隔見守りシステムを提案する。本システムでは、見守り対象の至近に配置するスマートフォンに電源配線を必要としないため配置の自由度が非常に高く、また、給電部については離れた位置に配置できるため、幼児や高齢者が誤って配線を外したり、ベッドが機器本体を壊したりといった問題を防ぎやすいという利点がある。

本システムは、スマートフォンの起動を判断する情報源、マイクロ波給電源とそのコントローラ、図 2 に示したマイクロ波給電方式の USB ドングル、部屋ごとに設置されたスマートフォンから構成される。情報源としては、Wi-Fi 電波を用いた行動認識技術 [6] を用いることで、見守り対象の異常な動きを検知できる。Wi-Fi 電波を用いた行動認識はプライバシーの侵襲度が低い反面、実際に何が起きているのかを正確に検知できない。たとえば、見守り対象が動かなくなった場合に、ベッドで寝ているだけなのか、ソファに座ってテレビを見ているのか、持病の発作により倒れたのかの判別ができない。そこで、状況を確認するために、本システムはマイクロ波給電源に通電し部屋に設置されたスマートフォンを起動する。ここで、Wi-Fi 電波を用いた行動認識技術で対象ユーザの居場所がある程度分かれば、見守り対象のいる部屋に設置されたスマートフォンだけを選択的に起動することも可能である。起動後は、スマートフォンで部屋の様子を撮影し、遠隔地の家族に送り届ける。必要に応じて、事前に録音した音声で見守り対象とコミュニケーションをとったり、遠隔地の家族と音声通話を始めたりできる。画像認識の技術と組み合わせれば、異常状態を検知して自動的に救急車を呼ぶことも可能となる。また、遠隔地にいる家族のスマートフォン上のアプリから、マイクロ波給電源のコントローラにセンシング指令を送信し、オンデマンドで見守り対象の状態を確認することもできる。このように、我々のシステムでは、手持ちのスマートフォンを再利用することで初期コストを抑え、運用コストを定期的なスマートフォンの充電作業のみにとどめつつ、スマートフォン本来の能力を活かした多彩なアプリとの連携により拡張性の高いサービスを提供できる。

図 7 は、室内に設置されたプロトタイプの様子である。ここでは、棚の上にスマートフォンを設置することで、十分に広い視野角を得ている。我々のデモ実験では、マイクロ波給電源から 3 m 離れた位置に USB ドングル付きのスマートフォンを設置した。給電開始から平均 38.5 秒で室内の様子を撮影し、平均 65.0 秒で撮影画像を家族に送り

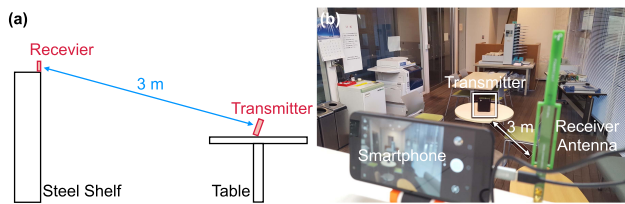


図 7 (a) 遠隔見守りのデモ実験の配置図, (b) スチール棚の上に設置した見守りシステムのプロトタイプ

Fig. 7 (a) Layout drawing of the demonstration experiment for remote monitoring system, (b) The prototype for remote monitoring system deployed on a tall steel shelf.

届けることに成功している。なお、撮影した画像サイズは 4,032 × 3,024 ピクセルであり、ファイルサイズはおよそ 2.6 MB であった。撮影画質と応答速度の優先度によっては、撮影画像サイズを調整する余地がある。いずれにせよ、先進国の都市部における救急車の到着待ち時間が 10 分程度であることをふまえると、この遅延時間は十分に実用的である。

3.2 ジオフェンス：家畜管理システム

ジオフェンスは郵便小包や貨物コンテナといった移動体の追跡に有望な技術である。その追跡対象は無生物に限らず、乳幼児やペット、家畜といった自発的に動き回るものも対象となりうる。とりわけ家畜は 1 頭あたり数十万円と比較的高価であり、飼育柵の破損により連鎖的な脱走が発生しうる。周辺住民の安全を確保し、周囲の農作物の食害を防ぐためにも、迅速な検知と捕獲が求められる。このように家畜の脱走を検知し、脱走後に位置追跡を行うシステムには少なからず需要があるが、手頃なソリューションが存在しないのが現状である。これは主に、GPS モジュールの消費電力が大きいために電池の消耗が激しく、日々の充電作業が不可欠で手間がかかるという技術的な問題に起因すると考えられる。また、アクティブ RFID タグを用いて脱走を検知する方法も考えられるが、家畜の脱走が発生した場合に、継続的な位置追跡をできない点が問題となる。

WakeDroid には、無線トリガ信号の到達距離の限界という形で、ジオフェンスの特徴がもともと備わっている。具体的には、WakeDroid はスマートフォンがマイクロ波給電エリアに入ったときにしかスマートフォンを起動できない。さらに、マイクロ波給電源ごとに異なる ID を割り当てておくことで、スマートフォンはどの給電エリアに入ったのかを検知できる。従来の GPS 方式のジオフェンスと比べると位置特定に必要な電力が桁違いに少なく、iBeacon をトリガとする方式と比較してもスマートフォン自体の待機電力をほぼゼロに抑えられるため、電池寿命を飛躍的に向上させることができる。

図 8 に家畜管理システムのプロトタイプを示す。このプロトタイプは、スマートフォンとマイクロ波給電方式の

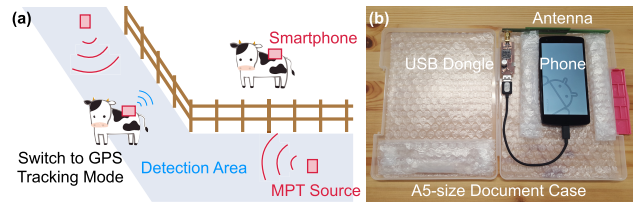


図 8 (a) 家畜管理システムの概要, (b) システムのプロトタイプ
Fig. 8 (a) The overview for livestock management system, (b) The prototype developed for the system.

USB ドングル、衝撃吸収用のクッション材とプラスチック製の筐体から構成される。パッケージ全体の重量は約 300 g であり、寸法は 225 × 175 × 25 mm と小型である。管理対象の家畜にこのパッケージを取り付け、飼育柵の外側にマイクロ波給電源を設置した脱走検知エリアを設けておく。家畜が飼育柵を越えて飼育場の外に出ると、パッケージが給電エリアに入り WakeDroid が作動してスマートフォンを起動する。スマートフォンの起動後は飼育者に通知することに加え、位置追跡モードに切り替わり携帯電話網を介して現在地を通知し続ける。これにより、家畜が飼育場の外に出てしまった場合でも、飼育者は家畜の行方を追うことができる。加えて、遠隔操作で振動や音を鳴らして家畜を驚かせたり、フラッシュを点滅させて捜索時の被視認性を高めたり、といった機能を実装することも考えられる。

4. 検討事項

前章では、WakeDroid が様々なセンシングタスクに適用できる高いポテンシャルを持つことを、複数の応用例を交えて説明した。この章では、想定される 5 つの懸念事項について深く検討し、それらが杞憂にすぎないことを示す。

4.1 スマートフォンの機種依存

我々はこれまで、Android OS のリファレンスモデル 7 機種と、Android Open Source Project (AOSP) [7] で公開されている OS のソースコードを用いて、WakeDroid の開発を行ってきた。AOSP のソースコードは、適用対象の Android 端末からハードウェアドライバを抽出して所定の位置に配置し、いくつかのビルドパラメータを調整することで、あらゆる Android 端末に適用可能である。ここで、適用対象のスマートフォンに求められる要件は、シャットダウン操作に必要となるカーネル領域での root 権限へのアクセスと、カスタマイズした OS イメージのインストールに必要なブートローダアンロックの 2 点である。WakeDroid を様々な機種に対応させるためのより簡便な手法は、CyanogenMod [8] や MIUI [9] といった Android OS の派生ディストリビューション (カスタム ROM) を活用することである。これらのカスタム ROM は、すでにそれぞれ 1,000 万人以上のユーザを獲得しており、様々なデバイス上で実際に動作している。WakeDroid では、機種依存

のある API や機能を利用しないため、原理原則としてはこれらのカスタム ROM と同様に 1,000 万台以上の Android デバイスで動作可能である。

これとは別の懸念事項は、OS バージョンによる違いである。とりわけ、Android 5.0 で導入された SELinux は、システム領域における近年では最大の変更点である。SELinux は通常ユーザだけでなく管理者ユーザや root ユーザの特権までも制限するため、安易には root 権限を利用できなくなる可能性がある。この点について調査したところ、Android OS ソースコードに含まれる SELinux の定義ファイルを編集することで、制限を回避できることが明らかとなった。

4.2 起動トリガの無線信号の到達距離

2.2 節で紹介した無線起動トリガの技術は、対象のスマートフォンへの電源ケーブルの配線を不要とし、デバイス配置の自由度を大きく向上させた。しかしながら、無線信号の電波伝搬に起因する制限は依然として残っている。WakeDroid では無線信号を起動指令の送達だけでなく、USB ドングルへの電源供給にも使用するため、通常の無線通信用途と比べて電波の到達範囲の問題は重大である。この節では、無線起動トリガ信号の到達範囲の上限を明らかにする。

電波の到達距離を左右する要素には、大まかにいって以下の 3 つがある。まず 1 点目として、日本において電波法上の無線局免許を取得することなく利用できる周波数帯は、2.4 GHz 帯や 915 MHz 帯など ISM バンドに限られる。より低い周波数帯では、伝搬損失が小さくなり、到達距離が長くなる傾向があるが、ほとんどの商用無線機器は ISM バンドを採用しているため、ISM バンドを利用するならば RFID リーダや Wi-Fi アクセスポイントなどの既存機器でマイクロ波給電源を代用したり、受信回路の実装に既製品を流用したりでき、コストを抑えられるという利点がある。

次に 2 点目として、多くの国において無線電波の送信出力は法令により規制されている。日本の電波法では、用途を問わず 10 kHz 以上の高周波電流を利用して高周波エネルギーを発生させる設備を高周波利用設備と定義しており、出力が 50 W を超える設備については総務省から許可を受ける必要がある [10]。WakeDroid で使用する 915 MHz 帯のマイクロ波給電も本規制の対象であり、無線局免許の取得手続きを省略する場合、法令上許される送信出力は 50 W が上限となる。これに加えて、送信機の周辺に存在しうる人体や動物の防護についても検討する必要がある。総務省の電波防護指針による規定では、特別な防護措置をとらない場合の 915 MHz での電力密度の上限は 0.61 mW/cm^2 である [11]。ここで、無指向性の点アンテナを仮定し、アンテナから 1 m 離れた点での電力密度を考える。半径 1 m の球の表面積は約 12.6 m^2 であり、上記の上限を満たす最大出力は 76.6 W となる。したがって、アンテナの半径 1 m 以内に人や動物が立ち入らないよう対策を講じる場合、送

信アンテナ利得を含めて 76.6 W 以内であれば安全である。

さらに 3 点目として、無線電波の電界強度は、送信機からの距離の 2 乗に反比例する。この問題については、送信側・受信側の双方に指向性アンテナを用いることで緩和できるが、代償として配置の自由度が低下してしまう。ここでは、高指向性アンテナの配置調整の難しさを考慮し、配置の自由度を確保するため、送受信機の位置合わせが困難となるほど指向性の高いアンテナは使用しないこととした。

2.2 節で述べた給電波の到達距離の計測結果に基づき、送信機の出力を 0.48 W から法定上限出力の 50 W に向上させた場合、計算上の到達距離は 307 m となり、307 m 離れたスマートフォンを起動できることになる。これは、Wi-Fi アクセスポイントのように単一の送信機で、一軒家や小規模な農場をカバーするのに十分である。

4.3 中古スマートフォンの電池容量

中古スマートフォンの内蔵バッテリーは使い古されており、新品のバッテリーより電池容量が幾分少ない。実効的な電池容量は電池駆動時間に直接的に影響を与える重要な要素であるため、我々は中古スマートフォンのバッテリーを用いて実効容量の計測実験を行った。この検証実験では、購入から 3 年以上が経過した中古スマートフォンの内蔵バッテリー 10 個を使用した。なお、Android OS の仕様上、バッテリーの充放電回数や電源投入回数、累計稼働時間を調べることができる API が存在せず、各端末の詳細な利用状況は不明である。ここで Nexus シリーズのスマートフォンを使用しなかったのは、内蔵バッテリーを取り外せない仕様の機種が大半であり、ロジックボードの影響を除きつつ計測を行うのが難しいためである。

この実験では、対象のバッテリーに 12Ω 抵抗を接続し、放電時間と出力電圧の変化を測定した。抵抗値を 12Ω としたのは、スマートフォンの画面を消灯した状態で LTE 通信を行う際の消費電流が 0.3 A 前後であり、これに近い電流量を確保するためである。ここでは、電池の実効容量を、満充電したバッテリーが出力電圧 3.0 V を下回るまでに放電できる容量と定義する。なお、閾値を 3.0 V に設定したのは、リチウムイオン電池の放電終始電圧が 2.5 V であるにもかかわらず、3.0 V を下回った時点で自動的にシャットダウンする Android 端末が存在するためである。

表 4 と図 9 は、公称容量と実効容量の比較である。ほとんどのバッテリーが、3 年経過後も公称容量の 80% 以上の電池容量を維持しており、公称容量に対する実効容量の比率は平均 82.2% であった。この計測結果より、中古スマートフォンであっても電池駆動のセンサノードとして高いポテンシャルを持つことが確認された。

4.4 既存の省電力モードとの消費電力比較

WakeDroid を用いることで、通常の中古スマートフォ

表 4 中古スマートフォンの電池容量

Table 4 Battery capacity of used smartphones.

Model	Release	Measured / Nominal	(%)
Xperia arc SO-01C	2011/03	1,294 / 1,500 mAh	86.3%
PHOTON ISW11M	2011/10	1,411 / 1,650 mAh	85.5%
EVO 3D ISW12HT	2011/10	1,398 / 1,730 mAh	80.8%
Optimus X IS11LG	2012/01	1,295 / 1,500 mAh	86.3%
GALAXY S2	2012/01	1,613 / 1,850 mAh	87.2%
WiMAX ISW11SC			
HTC J ISW13HT	2012/05	1,347 / 1,810 mAh	74.4%
Optimus G LGL21	2012/11	1,696 / 2,210 mAh	76.7%
GALAXY S3	2012/11	1,743 / 2,100 mAh	83.0%
Progre SCL21			
Xperia VL SOL21	2012/11	1,402 / 1,700 mAh	82.5%
Ascend HW-01E	2012/11	1,463 / 1,800 mAh	81.3%

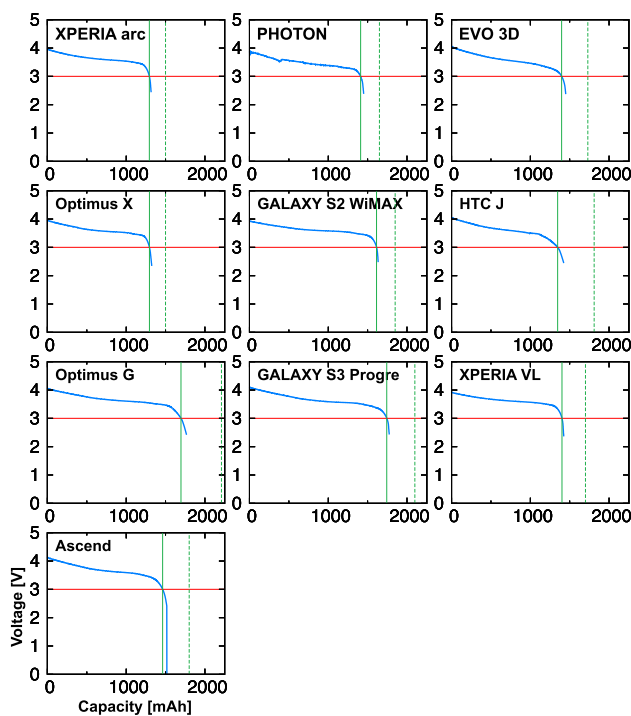


図 9 中古スマートフォンの内蔵バッテリーの放電電圧の時間変化. 緑線は実効容量を点線は公称容量を示す

Fig. 9 Voltage depression curves of batteries in used smartphones. The green lines are the measured battery capacities and the dotted lines are nominal capacities.

ンを「ノーマリーオフ」のセンサノードとして間欠的に動作させることが可能となるが、WakeDroidには2.4節の冒頭で定義した電力的オーバーヘッドが存在する。この節では、提案手法を用いる場合と、機内モードや緊急時モードといったAndroidスマートフォンに備わっている既存の省電力モードを用いる場合とで、電力消費の大小関係を検証する。いうまでもなく、この大小関係はセンシングタスクのデューティサイクルの長さに依存し、待機時間が長いほど我々の提案手法が有利になる。もちろん、OS起動中の消費電力を最小化するために、既存の省電力モードを我々

の手法と組み合わせることも可能である。

ここで我々は、Google純正のAndroid 4.4をインストールしたNexus 5で、Android OSの起動プロセス、Android OSのシャットダウンのプロセス、スリープモード、機内モードでの消費電力を測定した。この実験では、Nexus 5を分解して内蔵バッテリーを取り外し、バッテリー接続端子に直流安定化電源から4.2Vの電圧を印加しつつ、マルチメータ(Keysight 34410A)で電流量を計測した。なお、ここで印加電圧を4.2Vとしたのは、リチウムイオン電池の満充電時の最大出力電圧に合わせたためである。我々の実験結果によると、起動・シャットダウンによる電力的オーバーヘッドは、1サイクルあたり平均70.5W・sであった。一方、スリープモードでの待機電力は0.25W、機内モードでは0.04Wであった。これらの結果より、デューティサイクルが $70.5 \div 0.25 = 282$ 秒(4.7分)より長い場合には、スリープモードで待機するよりWakeDroidを用いて間欠駆動の方が省電力となる。また、機内モードと比較した場合は、 $70.5 \div 0.04 = 1,762.5$ 秒(29.4分)より長いデューティサイクルで提案手法が有利となる。

緊急時モードについては、Samsung Galaxy S6 edge SCV31とSONY Xperia M4 Aqua Dual E2363を用いて電池寿命の調査を行った。両モデルとも、通常モードと緊急時モードの切替えに10秒以上かかり、緊急時モードではサードパーティ製のアプリを起動できないなど、実用性は決して高くない。さらに、Galaxy S6 edgeでは、カメラを利用できない仕様となっている。これらの機種は内蔵バッテリーを取り外せず正確な消費電力を測定できないため、ここでは消費電力の下限を見積もるためにメーカー公称の電池寿命から消費電力を割り出した。Galaxy S6 edgeの緊急時モードでの公称電池寿命は17.5日であり、平均消費電力は23.5mWとなる。したがって、50分以上のデューティサイクルにおいて提案手法が有利となる。Xperia M4 aquaについては、公称電池寿命が22.8日であり、70.4分以上のデューティサイクルにおいて提案手法が有利となる。したがって、使用頻度が1日あたり20回を下回るようなユースケースにおいては、従来の省電力モードと比べて提案手法の方が省電力である。

また、Huaweiなどいくつかのメーカーは、スマートフォンを電源オフ状態で待機させ、指定した時刻に再び起動する機能を実装している。しかしながら、このタイマ起動機能ではWakeDroidのあらゆる機能を再現できるわけではない。まず、このタイマ起動機能はユーザや外部デバイスからのセンシング指令を認識し対応することができない。次に、起動時刻のスケジュール設定は柔軟でなく、1日または1週間以内に限定される。さらに、このタイマ起動機能の実装には、特定のCPUと特別なハードウェア構成が必要である。我々の知る限りでは、世界最大のスマートフォン向けCPUベンダQualcommが製造するSnapdragonシリ-

ズの CPU や、世界最大のスマートフォンメーカー Samsung が製造する Exynos シリーズの CPU ではサポートされていない。いくつかの中堅 CPU ベンダはこのタイマ起動機能をサポートしているものの、特定の CPU と特別なハードウェア構成が必要である。AnTuTu の調査によると、Qualcomm の Snapdragon シリーズと Samsung の Exynos シリーズを合わせた世界シェアは 2016 年現在で 70% を超えており、タイマ起動機能は幅広い機種に備わった一般的な機能とはいえない状況である [12]。

4.5 セキュリティの確保

ネットワークに接続されたあらゆる情報機器は、つねにセキュリティ上の脅威に曝されている。センサノードとして活躍する中古スマートフォンも例外ではなく、携帯電話網のパケット通信や Wi-Fi 通信を介して攻撃を受ける可能性がある。また、ネットワークに接続されていない機器でも、リムーバブルメディアや Bluetooth 接続を介して攻撃を受けた事例が報告されている [13], [14]。

センサノードとしてのスマートフォンは、通常用途のスマートフォンとは異なりアプリストアを利用しないため、マルウェアアプリが混入する可能性は低いものの、OS レベルの脆弱性は避けられない。このような脆弱性を修正しセキュリティを確保するため、各 OS ベンダはセキュリティパッチを定期的に配信している。Android OS の場合、リファレンスモデルである Nexus/Pixel シリーズに対しては、発売後 3 年間にわたって月例パッチや OS アップデートが配信されている。一方で、一般の Android 端末に対するパッチ配信は製造メーカーに委ねられており、その履行率は必ずしも高くない (表 5)。また過去には、端末の販売を取り仕切る携帯電話事業者が、端末の性能不足を理由に国内への OS アップデートの配信を拒否した例も存在する。

他方で、Android OS の派生ディストリビューション (カ

表 5 2016 年 12 月~2017 年 11 月の 12 カ月間における Android 端末向けの月例セキュリティパッチの配信状況

Table 5 Delivery status of the monthly security patches for Android smartphones from Dec. 2016 to Nov. 2017.

Model	Release	Delivery Rate
arrows NX F-02H	2015/12	33%
arrows SV F-03H	2016/07	50%
arrows NX F-01J	2016/12	58%
Xperia Z5 SO-01H	2015/10	33%
Xperia X Performance SO-04H	2016/06	58%
Xperia XZ SO-01J	2016/11	67%
GALAXY S5 SC-04F	2014/05	17%
Galaxy S6 SC-05G	2015/04	33%
Galaxy S7 edge SC-02H	2016/05	33%
AQUOS ZETA SH-03G	2015/05	33%
AQUOS Compact SH-02H	2015/12	33%
AQUOS ZETA SH-04H	2016/06	50%

スタム ROM) の開発コミュニティでは、古いハードウェアを広くサポートする動きが見られる。たとえば、Lineage OS (旧 CyanogenMod) は、2011 年 2 月発売の GALAXY S2 や 2012 年 9 月発売の Xperia V から、2017 年 2 月発売の LG G6 に至るまで、非常に幅広い端末に対して Android 7.1 ベースの OS イメージを提供している。したがって、メーカーによるサポートがすでに打ち切られた端末については、純正の Android OS より、むしろサードパーティ製のカスタム ROM を導入した方が安全性を高く保ちやすい。

センサノードとして活躍する中古スマートフォンについても、セキュリティを確保するためには OS を最新状態に保つことが望ましい。より具体的には、センサノードに転用する際にカスタム ROM の最新バージョンを導入し、充電作業のたびに OS アップデートを行うことが好ましい。バッテリーが 1 年程度で自然放電することを考慮すると、端末を使用しない場合であっても年 1 回は充電作業が必要であり、最低でもこの頻度で OS アップデートの機会を得られる。また、緊急性のきわめて高いパッチについては、携帯電話網を介して OTA アップデートを行うこともできる。

5. 関連研究

この章では、スマートフォンを無線センサノードとして活用するための既存のアプローチを紹介する。これらの提案のほとんどは、対象のスマートフォンが所有者とともに行動し、日々の生活の中で所有者が定期的にスマートフォンを充電することを暗黙の前提としている。これとは対照的に、我々の提案する WakeDroid では、対象のスマートフォンがセンシング用途のみに使用されることを想定しているという大きな違いがある。しかしながら、これらの既存手法の中には、我々の手法と組み合わせることで、スマートフォンの機能性を高めたり、電池駆動時間を延長したりできるものも含まれる。

本稿の冒頭でも指摘したとおり、参加型センシングは Burke らが初めて提唱した概念である [15]。彼らは携帯電話機の持つ余剰能力に着目し、その能力をセンシング活動に充てることを提案した。スマートフォンを含め携帯電話機を用いた参加型センシングは、多くのユーザを低コストで集められるが、カバーエリアが確率的で確実性に欠けるという問題がある。Medusa は参加型センシングにおいて、主催者と参加者の間を取り持ち、センシングタスクの分配を補助するフレームワークである [16]。Medusa には対象のスマートフォンを電源オフ状態から起動する機能がないため、WakeDroid と組み合わせることで相補的な役割を果たせる。Medusa と同様のアプローチをとる研究はいくつかあり、いずれも WakeDroid とは相補的關係にある [17], [18]。

Piggyback Crowd Sensing (PCS) はセンシングタスクの実行に起因するスマートフォンの消費電力の増加を抑え

る手法である [19]. PCS は, 所望のセンサが他のアプリによって利用されているタイミングでセンシングを行うことで, センサの消費電力増を実質ゼロにする. 我々の想定シナリオにおいても, 複数のタスクを 1 台のスマートフォンでこなす場合には, この技術を応用できる.

位置測位に関しては, LEAP などの低電力 GPS 測位システムを適用することで, 消費電力を抑えつつ高精度な測位を実現できる [20]. LEAP は GPS 信号処理のパイプラインを分割し, 最も計算負荷の高い部分をクラウドサーバにオフロードすることで, 消費電力を最大 80%削減する. LEAP 以外にも, 同様のアプローチで位置測位を行う手法が提案されている [21], [22]. 前述のとおり, WakeDroid では給電波にエリア ID を埋め込むことで, GPS と比べて桁違いに少ない電力で位置特定が可能である.

加えて, スマートフォンのグラフィックス [23], ストレージ I/O [24], ヘテロニアスなマルチコア CPU [25] などに着目した省電力化手法が提案されており, WakeDroid と組み合わせることで, さらなる消費電力の削減を期待できる.

6. あとがき

本稿では, 特に商用電源の利用しにくい環境において専用センサノードとして稼動するスマートフォン向けに, 外付け電源管理システム「WakeDroid」を提案した. WakeDroid は, Android スマートフォンを充電器に接続した際に自動的に起動する電源状態管理ソフトウェアを拡張し, USB 端子に接続する USB ドングル型デバイスとして電源管理機能を実現する. WakeDroid の USB ドングルは無線電力伝送のためのレクテナを備え, 遠隔操作による Android スマートフォンの電源投入を実現する. 我々の評価実験では, 出力 0.48 W のマイクロ波給電源から 30 m 離れた地点にあるスマートフォンの起動プロセスを開始させることに成功した. WakeDroid は中古スマートフォンに低コストなセンサノードとしての「第二の人生」を与えることで, スマートフォンセンシングのコンセプトを大幅に拡張した.

謝辞 本研究は, JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の一環として実施されました. また, 到達距離の計測実験は鳴海紘也氏の協力を得て実施しました.

参考文献

[1] MM 総研: スマートフォンの修理サービス利用実態調査 (2017) (online), 入手先 (<https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=262>) (参照 2018-07-12).

[2] Polastre, J., Szewczyk, R. and Culler, D.: Telos: Enabling Ultra-low Power Wireless Research, *Proc. 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '05*, IEEE Press (online), available from (<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1147685.1147744>) (2005).

[3] Shen, H., Balasubramanian, A., LaMarca, A. and

Wetherall, D.: Enhancing Mobile Apps to Use Sensor Hubs Without Programmer Effort, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, pp.227–238, ACM (online), DOI: 10.1145/2750858.2804260 (2015).

[4] Guerrache, F., Aldabbagh, A. and Kanjo, E.: Multiple Sensor Fusion Approach to Map Environmental Noise Impact on Health, *Proc. 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct, UbiComp '16*, pp.1074–1078, ACM (online), DOI: 10.1145/2968219.2972710 (2016).

[5] Powercast Corp.: Powercast: P2110B Datasheet (2017) (online), available from (<http://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2016/12/P2110B-Datasheet-Rev-3.pdf>) (accessed 2017-02-14).

[6] Wang, W., Liu, A.X., Shahzad, M., Ling, K. and Lu, S.: Understanding and Modeling of WiFi Signal Based Human Activity Recognition, *Proc. 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '15*, pp.65–76, ACM (online), DOI: 10.1145/2789168.2790093 (2015).

[7] Google LLC: Android Open Source Project (2017), available from (<https://source.android.com/>) (accessed 2017-01-15).

[8] CyanogenMod: CyanogenMod – Android Community Operating System (2016), available from (<https://www.cyanogenmod.org/>) (accessed 2017-01-15).

[9] Xiaomi: Xiaomi MIUI Official Global Site (2017), available from (<http://en.miui.com/>) (accessed 2017-01-15).

[10] 総務省: 高周波利用設備とは (2009), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/other/koshuha/gaiyo/index.html>) (参照 2018-04-23).

[11] 総務省: 電波防護指針 (1990), 入手先 (<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/material/dwn/guide38.pdf>) (参照 2018-04-23).

[12] AnTuTu: Chip Brand Distribution and Market Shares 2016 (2017), available from (<http://www.antutu.com/doc/107751.htm>) (accessed 2017-03-29).

[13] Trend Micro Inc.: STUXNET Malware Targets SCADA Systems (2010), available from (<https://www.trendmicro.com/vinfo/us/threat-encyclopedia/web-attack/54/stuxnet-malware-targets-scada-systems>) (accessed 2017-10-26).

[14] Trend Micro Inc.: BlueBorne: Bluetooth Vulnerabilities Expose Billions of Devices to Hacking (2017), available from (<https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/news/internet-of-things/blueborne-bluetooth-vulnerabilities-expose-billions-of-devices-to-hacking>) (accessed 2017-10-26).

[15] Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M.B.: Participatory sensing, *Workshop on World-Sensor-Web (WSW'06): Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications* (2006).

[16] Ra, M.-R., Liu, B., La Porta, T.F. and Govindan, R.: Medusa: A Programming Framework for Crowd-sensing Applications, *Proc. 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '12*, pp.337–350, ACM (online), DOI: 10.1145/2307636.2307668 (2012).

[17] Shen, H., Balasubramanian, A., LaMarca, A. and Wetherall, D.: Enhancing Mobile Apps to Use Sensor Hubs Without Programmer Effort, *Proc. 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, pp.227–238, ACM (on-

- line), DOI: 10.1145/2750858.2804260 (2015).
- [18] Metri, G., Shi, W., Brockmeyer, M. and Agrawal, A.: BatteryExtender: An Adaptive User-guided Tool for Power Management of Mobile Devices, *Proc. 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '14*, pp.33–43, ACM (online), DOI: 10.1145/2632048.2632082 (2014).
- [19] Lane, N.D., Chon, Y., Zhou, L., Zhang, Y., Li, F., Kim, D., Ding, G., Zhao, F. and Cha, H.: Piggyback Crowdsensing (PCS): Energy Efficient Crowdsourcing of Mobile Sensor Data by Exploiting Smartphone App Opportunities, *Proc. 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '13*, pp.7:1–7:14, ACM (online), DOI: 10.1145/2517351.2517372 (2013).
- [20] Ramos, H.S., Zhang, T., Liu, J., Priyantha, N.B. and Kansal, A.: LEAP: A Low Energy Assisted GPS for Trajectory-based Services, *Proc. 13th International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '11*, pp.335–344, ACM (online), DOI: 10.1145/2030112.2030158 (2011).
- [21] Misra, P.K., Hu, W., Jin, Y., Liu, J., Souza de Paula, A., Wirstrom, N. and Voigt, T.: Energy Efficient GPS Acquisition with Sparse-gps, *Proc. 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '14*, pp.155–166, IEEE Press (online), available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2602339.2602357> (2014).
- [22] Paek, J., Kim, K.-H., Singh, J.P. and Govindan, R.: Energy-efficient Positioning for Smartphones Using Cell-ID Sequence Matching, *Proc. 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '11*, pp.293–306, ACM (online), DOI: 10.1145/1999995.2000024 (2011).
- [23] Han, H., Yu, J., Zhu, H., Chen, Y., Yang, J., Xue, G., Zhu, Y. and Li, M.: E3: Energy-efficient Engine for Frame Rate Adaptation on Smartphones, *Proc. 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '13*, pp.15:1–15:14, ACM (online), DOI: 10.1145/2517351.2517364 (2013).
- [24] Nguyen, D.T., Zhou, G., Qi, X., Peng, G., Zhao, J., Nguyen, T. and Le, D.: Storage-aware Smartphone Energy Savings, *Proc. 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13*, pp.677–686, ACM (online), DOI: 10.1145/2493432.2493505 (2013).
- [25] Ra, M.-R., Priyantha, B., Kansal, A. and Liu, J.: Improving Energy Efficiency of Personal Sensing Applications with Heterogeneous Multi-processors, *Proc. 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '12*, pp.1–10, ACM (online), DOI: 10.1145/2370216.2370218 (2012).



高木 雅 (正会員)

1990年生。2013年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2015年同大学大学院修士課程修了。2018年同博士課程修了。博士(情報理工学)。同年日本電信電話株式会社(NTT)に入社。電子情報通信学会会員。



池内 尚史 (学生会員)

1991年生。2016年慶應義塾大学理工学部電子工学科卒業。2018年東京大学大学院修士課程修了。同博士課程に在学中。電子情報通信学会会員。



角谷 和宣 (学生会員)

1993年生。2017年東京大学工学部電子情報工学科卒業。同大学大学院修士課程に在学中。電子情報通信学会会員。



川原 圭博 (正会員)

1977年生。2000年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2002年同大学大学院修士課程修了。2005年同博士課程修了。博士(情報理工学)。2005年同大学院情報理工学系研究助手。助教を経て、2010年同講師、2013年同准教授。2011~2013年ジョージア工科大学客員研究員およびMIT Media Lab客員教員を兼任。2014年AgIC株式会社技術アドバイザー。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。