Vol.2016-HCI-170 No.10
Vol.2016-UBI-52 No.10
2016/10/25

マイクロ波給電を用いた Androidスマートフォンの遠隔起動トリガ

池内　尚史[1,a)]　高木　雅[1,b)]　川原　圭博[1,c)]　浅見　徹[1,d)]

概要：スマートフォンの野外での長期運用には間欠駆動が不可欠であるが，従来のマイコン制御では専用電源が必要であり，これがシステム全体の電池寿命を制約するという問題があった．本稿では，USB 端子に短時間だけ電圧を印加するとスマートフォンが起動することに着目し，マイクロ波給電を用いて受動回路のみでスマートフォンを遠隔から起動する手法を提案する．本提案手法では，分散配置された多数のスマートフォンを一斉起動することも可能である．実際にスマートフォン 4 機種について起動をトリガするために必要な電力を測定し，Powercast を用いて 1m 離れた地点からマイクロ波給電を行いスマートフォンを起動できることを確認した．

キーワード：スマートフォンセンシング，間欠駆動，マイクロ波送電，遠隔起動

Remote Boot Trigger for Android Smartphones Using Microwave Power Transfer

Takashi Ikeuchi[1,a)]　Masaru Takagi[1,b)]　Yoshihiro Kawahara[1,c)]　Tohru Asami[1,d)]

Abstract: Although intermittent operation is necessary for smartphone sensing in outdoor environment, it requires a micro controller and an external battery which limits the battery life of the whole system. In this paper, we propose a remote boot trigger for Android smartphones using microwave power transfer whose receiver consists of passive circuit only. This system exploits the feature of Android smartphones to boot up automatically when connected to a charger. With this system, it is possible to trigger multiple smartphones to boot at a time. We measured the minimum power to boot smartphones and implemented a prototype with Powercast to confirm the capability of remote trigger 1m away from the smartphone.

Keywords: Smartphone Sensing, Intermittent Operation, Microwave Power Transfer, Remote Boot

1. はじめに

近年，大手キャリアの端末販売価格の高騰と，仮想移動体通信事業者（MVNO）の台頭により，中古スマートフォンが広く流通するようになった．スマートフォンにはカメラや GPS だけでなく加速度や温度などの様々なセンサが搭載されており，様々なセンサデータをまとめて取得できる．さらに，Wi-Fi，Bluetooth，LTE/3G 回線など数多くの無線通信インタフェースも備えている．これらの理由からスマートフォンをセンシング活動に応用する研究が広く行われてきた [1], [2], [3]．スマートフォンを用いてセンシングを行う際の課題として，連続駆動時間が短いことが挙げられる．このため，スマートフォンのバッテリー寿命を伸ばすための研究も盛んに行われている．しかしながら，これらの研究では Android OS が常時起動していることを暗黙の前提としており，無視できないレベルの待機電力が発生する．そこで，センシングが必要な時にだけスマート

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
a)　ikeuchi@akg.t.u-tokyo.ac.jp
b)　takagi@akg.t.u-tokyo.ac.jp
c)　kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp
d)　asami@akg.t.u-tokyo.ac.jp

フォンを起動させ，待機中はスマートフォンの電源をオフにできればスマートフォンの消費電力を極力抑えることが可能になり，スマートフォンを長期運用することが可能になる．[4], [5] ではマイコンなどの外部機器からスマートフォンを起動させることで，スマートフォンの間欠駆動を実現している．しかしながら，この手法ではマイコンを駆動させるための外部電源が別途必要であり，その外部電源が全体のシステムの電池寿命を制約してしまうという問題がある．

そこで本研究では，マイクロ波給電技術を応用し，内蔵バッテリーに頼ることなく，受動回路のみでスマートフォンを遠隔起動する手法を提案する．本稿の構成は以下の通りである．2 節では，本稿で提案するシステムの概要を述べる．3 節では，microUSB 端子からスマートフォンの起動をトリガするのに必要な最小電力量を調べる実験を紹介し，印加する電圧や時間に対してどのような依存関係があるかを論じる．4 節では，3 節の実験結果を元に実際に Powercast を用いて 1m 離れた地点からマイクロ波給電を行い，Android スマートフォンを遠隔起動できることを実証する．5 節で本研究の関連研究について述べ，最後に本稿の内容をまとめる．

2. 提案するシステムの概要

図 1 に本稿で提案するのコンセプト図を示す．起動指令の送信側には商用電源に接続したマイクロ波送電装置を設置し，周囲のスマートフォンを起動したい時にのみマイクロ波を送信する．受信側では，アンテナと整流回路，昇圧回路を用いてマイクロ波から電力を取り出し，スマートフォンの micro USB 端子に所定の電圧を印加してスマートフォンを起動させる．なお，受信側は受動回路のみで構成され，バッテリー等の電源を必要としない．

無線電力伝送には，主に電磁誘導方式，磁界共振結合方式，マイクロ波方式の 3 方式がある．電磁誘導方式は高効率で電力を伝送できるが，伝送距離が伸びると伝送効率が著しく低下する，送受電コイル間の距離が数センチ程度に制約される．それゆえ，屋外での利用には適さない．磁界共振方式は，数 m 程度の距離を比較的高い伝送効率で送電可能であるが，送電できる距離が送電に用いる共振器の直径の数倍程度に制約されるため，長距離での伝送は現実的ではない [6]．マイクロ波方式は，数 km 程度までの長距離で，一度に複数の受信機に対して電力を供給可能であるが，送信電力に制限があるため受電側で得られる電力が小さいという欠点がある [7]．本研究では，農場など広大な空間に散在する複数の端末を起動することを目標としていることからマイクロ波方式を採用した．

アンテナには様々な種類があるが，受信側の回路構成や，サイズを考慮に入れた場合，八木アンテナのような巨大なアンテナは現実的でなく，またパッチアンテナはサイズが小さいものの，指向性ゆえにアンテナの向きがずれると受電電力が大幅に低下するという欠点がある．そこで本稿では最も構造が単純で水平面に対して指向性を持たない．無指向であるダイポールアンテナを採用した．

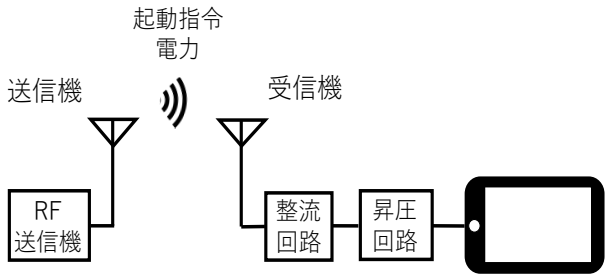

図 1 提案するコンセプト図

表 1 実際に用いた Android 端末

機種	OS バージョン	ビルド番号
Nexus S	4.1.2	JZ054K
Galaxy Nexus	4.3	JWR66Y
Nexus 4	5.1.1	LMY48T
Nexus 6	6.0	MRA58N

3. Android スマートフォンの起動トリガに必要な電力の測定

Android スマートフォンには，電源オフ状態で microUSB 端子に充電器を接続すると，Android OS を自動的に起動する機能が搭載されている．この機能は，Android OS のリファレンス機である Nexus シリーズの全端末と一部のメーカー製端末で利用可能である．microUSB 端子に電圧を印加してスマートフォンを起動させる場合，起動完了まで給電し続ける必要はなく，給電時間は 1 秒未満で良いことが知られている．また，印加電圧についても 5V が必要とは限らない．今回我々は，起動トリガとして必要な印加電圧と印加時間を明らかにするため実験を行った．この実験では，Android OS のリファレンス機である Nexus シリーズから表 1 に示す 4 機種を用いた．

3.1 測定実験の概要と考察

3.1.1 最低電圧と最低印加時間

測定実験の様子を図 2 に，回路図を図 3 に示す定電圧源として Tektronix 社のソースメータ 2450[8] を採用し，Nch MOSFET を用いてスイッチングを行うことでスマートフォンに電圧を印加する時間を制御した．Nch MOSFET は Nch MOSFET には International Rectifier の IRLML6344TRPBFTR を用いた．ゲートに電圧を印加するとドレインソース間が通電する．そこで，ゲートに Arduino の出力ピンを接続してスイッチング制御を行った．

図 2　起動トリガに必要な電力測定の様子

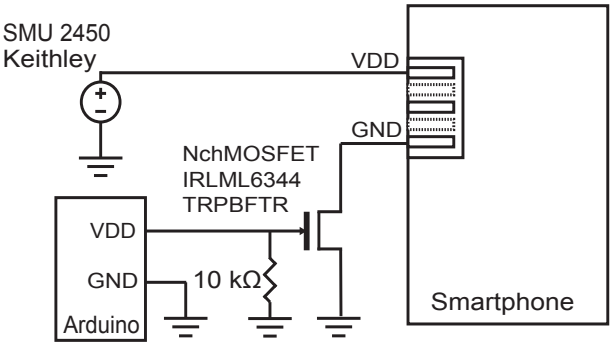

図 3　測定実験に用いた回路図

表 2　スマートフォンの起動トリガとして必要な印加時間と電圧

機種	平均電圧 (V)	平均電流 (mA)	時間 (s)	電力量 (mJ)
Nexus S	3.76	0.62	0.38	0.89
Galaxy Nexus	4.00	0.82	6.35×10^3	2.09×10^1
Nexus 4	3.92	1.21	0.06	0.28
Nexus 6	4.54	70.0	2.01×10^3	6.39×10^2

また，残留電荷をなくすために 10 kΩ のプルダウン抵抗を接続した．ドレイン側に，ソースメータとスマートフォンを接続した．ソース側に GND を接続した． まず，電圧印加時間を十分に長い 10 s に設定し，印加電圧を 3.5 V から 0.01 V ずつ上昇させることで，必要な最小電圧値を測定した．次に，電圧印加時間を 0 ms から 10 ms ずつ延長し，最小電圧値でスマートフォンを起動するのに必要な電圧印加時間の最小値を測定した．さらに，最小電圧と最小印加時間の組み合わせで，スマートフォンを起動させる際の電流量の変化を測定し，必要な最小エネルギーを算出した．なお，測定時は Android スマートフォンを満充電の状態とし，各実験は 10 回ずつ行い，結果には平均を示す． 実験結果を表 2 に示す．予想通り，起動トリガとして必要な電圧印加時間と電圧には機種依存が見られた．

3.1.2　印加電圧と消費エネルギーの関係

次に，印加電圧と必要なエネルギーとの関係についても検討した．Nexus S に関しては，最小電圧である 3.76 V から 3.7 V までは 0.01 V ずつ上昇させ，その後は 0.1 V ずつ 5 V まで上昇させて測定行った．Nexus 4 に関しては，最小電圧である 3.92 V から 3.95 V までは 0.01 V ずつ上昇させ，その後は 0.1 V ずつ 5 V まで上昇さて測定を行った．Galaxy Nexus に関しては，最小電圧である 4.0 V から 5 V まで 0.1 V ずつ上げて測定を行うプロトタイプを実装し，最後に Nexus 6 については最小電圧である 4.54 V から 4.6 V まで 0.01 V ずつ上昇させ，その後は 0.1 V ずつ 5 V まで上昇さて測定を行った．その結果を図 4 に示す．Nexus S に関しては，4.5 V までは起動をトリガするのに必要な時間が 380 ms 以上であったのに対して，4.5 V では起動をトリガできず，4.6 V 以上では必要時間が 2050 ms となった．また，印加電圧が 3.8 V の時にエネルギーが最小の 0.88 mJ となった．それ以降は電圧の上昇に伴って，必要なエネルギーが大幅に増えた．4.5 V で起動をトリガできなかった理由としては，スマートフォンの入力インピーダンスが高かったため，起動をトリガするのに必要な電流値に到達しなかったと考えられる．Nexus S 以外の機種については印加電圧によらず最低印加時間は一定であった．Nexus 4 に関しては，印加電圧が 3.93 V の時に最小エネルギーの 0.28 mJ となっており，電圧の上昇とエネルギーは概ね一致した．それ以外の機種に関しては表 2 に記載した最低電圧においてエネルギーが最小となった．

4.　Powercast を用いた実装と遠隔起動実験

3 節の実験により，スマートフォンを起動させるのに必要な電圧は充電器が出力する 5 V よりも小さい値でよく，電力量も機種によっては数 mJ 程度で済むことが明らかになった．そこで，汎用機器として用いられている Powercast[9] を用いて Android スマートフォンを遠隔起動する実験を行った（図 5）．測定条件は以下の通りである．送信機のアンテナには等価等方輻射電力 (EIRP) が 1 W のものを，受電機にはアンテナ利得が 1 dBi のダイポールアンテナを採用し，送電機と受電機を 1 m の間隔をあけて設置した．この時の条件で，受電側が受け取ることのできる電力 Pr の理論値は 0.856 mW である．なお，Pr の算出には以下のフリスの公式を用いた．

$$Pr = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \tag{1}$$

ここで，送電側の出力電力を P_t，送電側のアンテナ利得を G_t，受電側のアンテナ利得を G_r，波長を λ，送電側と受電側との間の距離を R とする．受電側の回路の RF-DC の変換効率は 44.2%であることを考慮すると [10]，最終的に得られる電力は 0.378 mW となる．この電力はコンデンサに一時的に蓄えられる．コンデンサの両端の電圧が 1.25 V まで上昇すると放電を始め，1.02 V まで低下すると放電を中止し，再び電荷を蓄える．放出された電流は昇圧されたのち出力端子に電流が流れるようになっている．コンデンサから放出された電力は，昇圧回路を通してスマートフォンに供給される出力電圧は 3.3 V〜5.25 V の間で調整

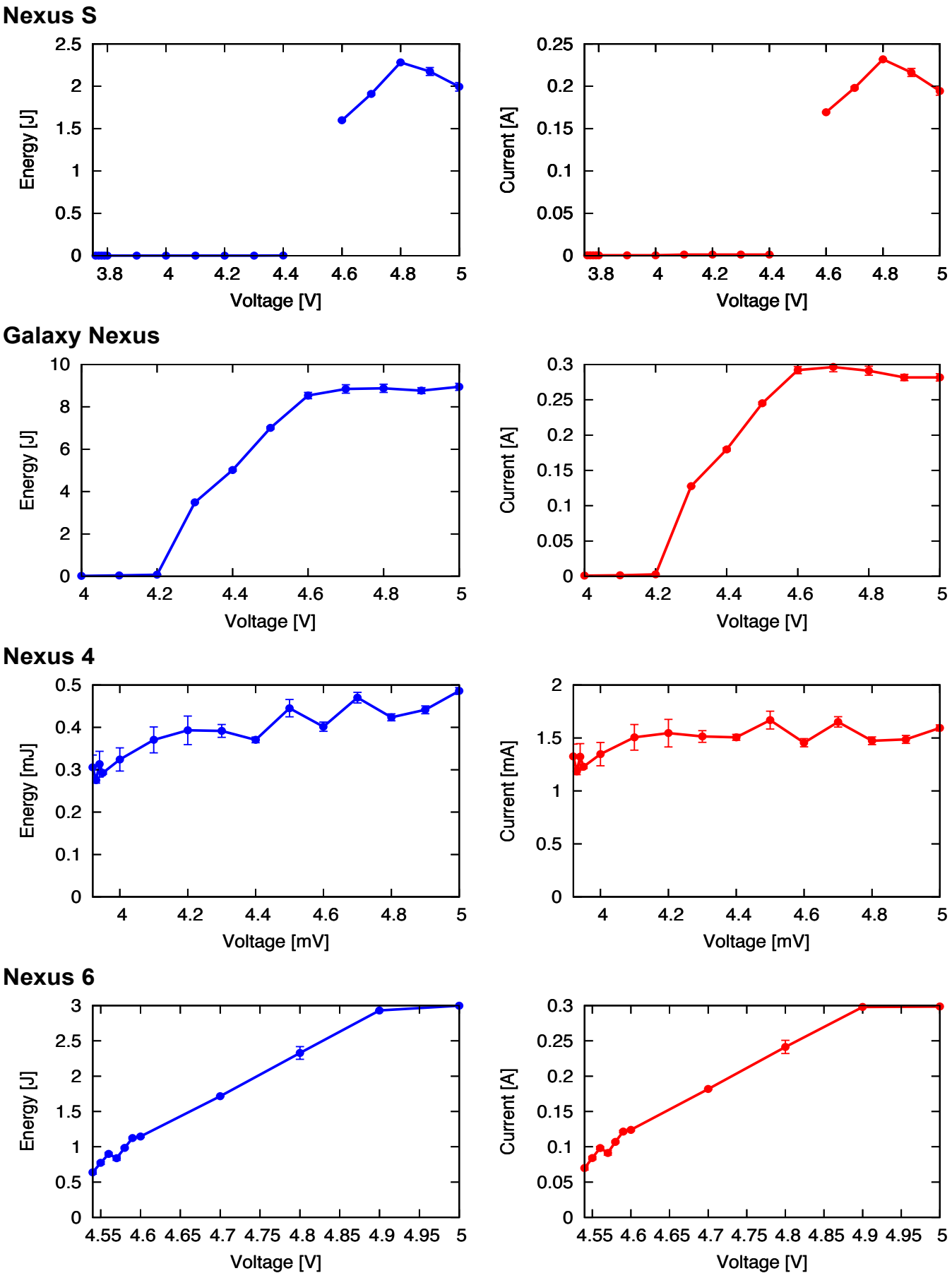

図 4　機種ごとの電圧に対する必要エネルギーと電流量の関係

図 5　スマートフォン遠隔起動実験の様子

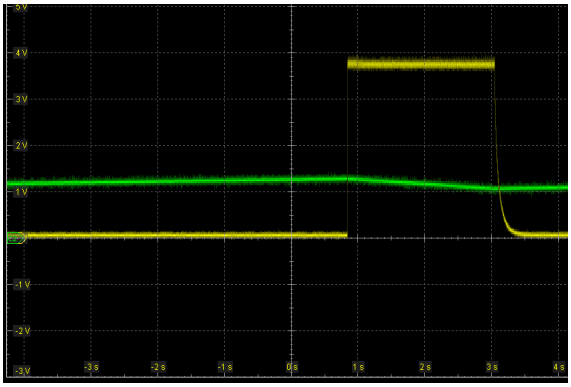

図 6　Nexus S に給電した際のコンデンサ両端の電圧と出力電圧

表 3　各端末に Powercast で給電する際に必要なコンデンサ容量

機種	必要なコンデンサ容量 (mF)	必要電圧値 (V)	コンデンサ容量 (mF)
Nexus S	1.33×10^1	3.76	50, 1000
Galaxy Nexus	3.31×10^2	4.00	50, 1000
Nexus 4	4.33	3.92	50, 1000

可能であり，実験に際して適宜調整した．図 6 に Nexus S に給電した際にコンデンサの両端に掛かる電圧と Nexus S に掛かる電圧の時間変化を示した．緑線がコンデンサの両端に掛かる電圧，黄線が Nexus S に掛かる電圧である．なお，Powercast 出力端のコンデンサの容量は以下の式を元に決定することが推奨されている [10].

$$C = 15V_{OUT}I_{OUT}t_{ON} \tag{2}$$

ここで，I_{OUT}, t_{ON} はそれぞれ，出力端子に放出したい電流値，出力端子に放出する時間である．表 2 より，Nexus S の起動をトリガするのに必要な電圧，電流，時間はそれぞれ 3.76 V，0.62 mA，0.38 s であるので，必要なコンデンサの容量 C_{NexusS} は 1.33×10^1 mF で良いことがわかる．同様にして Galaxy Nexus，Nexus 4，Nexus 6 についても必要なコンデンサの容量を算出した．表 3 にスマートフォン各機種に対して Powercast を用いてマイクロ波給電を行う際に必要なパラメータを示す．以上を元に今回の実験で必要な最小のコンデンサ容量と用いたコンデンサの容量を表 3 に示す．今回の実験では，Powercast の定格 100mA を超える電流が必要となる Nexus 6 を除く 3 機種を用いた．表 4，5 ははそれぞれコンデンサの容量を 50 mF，1000 mF と

表 4　50 mF コンデンサを用いた場合の動作

機種	起動したか	平均電圧（V）	印加時間（s）	初動時間（s）
Nexus S	YES	3.84	2.12	106.50
Galaxy Nexus	NO	3.87	0.27	78.58
Nexus 4	YES	3.96	2.10	22.90

表 5　1000 mF コンデンサを用いた場合の動作

機種	起動したか	平均電圧（V）	印加時間（s）	初動時間（s）
Nexus S	YES	3.82	122.57	422.02
Galaxy Nexus	NO	4.02	5.91	643.32
Nexus 4	YES	4.24	370.19	629.10

した時に，各端末が起動したか，平均印加電圧，印加電圧の持続時間，初動時間をまとめたものである．ここで初動時間はコンデンサの両端電圧が 0 V〜1.25 V まで上昇させるのに必要な時間を指す． Nexus S，Nexus 4 に関しては 50 mF，1000 mF 両方ので起動を確認できた．Nexus 4 の 1000 mF の印加時間が長いのは，コンデンサにかかる電圧が 1.25 V から 1.02 V まで下がり切らずにコンデンサへの充電が開始されてしまい，Nexus 4 に常に電圧が掛かっている状態になったためである．Galaxy Nexus に関しては，必要パラメータ以上のコンデンサを用意したのにもかかわらず起動できなかった．

5.　関連研究と本研究の位置づけ

野外での間欠駆動型のセンシングに関する研究として，[11] では，スマートフォンを用いた位置トラッキングを低消費電力で行う手法が提案されている．消費電力が大きい GPS でのトラッキングを定期的に行うのではなく，加速度や角度センサを用いて，異常な動きを検知した場合に GPS による位置情報を取得することで省電力化を実現している．しかしながら，自動車などの加速度や角度の急速な変化が大きい物体をセンシング対象する場合には，GPS による位置情報取得を頻繁に行うことが予想される．また，この手法では Android アプリを用いており，Android OS 上で動作するため，待機時の消費電力を無視できない．[4] では，Android 端末の Linux カーネルを間欠的に駆動させて省電力にセンシングを行う手法が提案されている．しかしこの手法では，Android 端末を定期的に起動させるための外部マイコンが外部電池を利用しており，これによってシステム全体の電池寿命が制約されてしまう．さらに，外部電池から制御マイコンと Android 端末に選択的に給電を行うための回路が必要であり，システムが複雑化しやすい．スマートフォンを用いない環境センシングとしては，[12], [13], [14] などが挙げられる．[12] では，植物の生育状況を監視するシステムや環境モニタンリグを目的とした，低消費電力なセンサノードの提案を行っており，待機時に MCU（Micro Control Unit）の動作をスリープさせるのではなく，完全に停止させることで低消費電力化を図っている．しかし，この手法では MCU が停止状態から回復するために外付けの RTC(Real Time Clock) 回路を追加する必

要があり，RTC 回路が動作しなくなると，システム全体が完全に動作しなくなってしまうという問題がある．[14] では，太陽電池と二次電池を用いて環境センシングを行うセンサを提案している．実際に 4，5 ノード程度の小規模のセンサネットワークを構築し，2 年間稼働させることに成功した．しかしながら，この手法では二次電池の交換のために定期的なメンテナンスが必要となる．これに対して，[13] では，一次電池や二次電池を用いずに，太陽電池とキャパシタのみを用いたメンテナンスフリーなセンサの開発と，そのセンサ上で動作するデータ収集プロトコルを提案している．しかしながら，太陽電池を用いる場合，日中しか給電を行うことができないという制約が生じる．

6. まとめ

本稿では，マイクロ波給電を用いてスマートフォンを遠隔起動する手法を提案した．受電側はマイコン等を含まない受動回路であり，送信側をタイマー制御するだけで，電源オフ状態の Android 端末を定時起動できるようになる．また，4 機種の Android 端末を用いて，起動トリガに必要なエネルギーを測定し，実際に Powercast を用いて 1m 離れた地点からスマートフォンを起動可能であることを実証した．本研究ではスマートフォンの起動をトリガする電力量の最小値を算出し，実際に Powercast を用いて送信機から 1 m 離したところからマイクロ波給電を行い，Nexus S と Nexus 4 の 2 機種に関して実際に起動することを確認した．この方法により，Android スマートフォン側にマイコンなどの外部機器を取り付ける必要がなくなったほか，送信側で時間を設定することで定期的なセンシングが可能になる．

参考文献

[1] Hu, S., Su, H., Liu, H., Wang, H. and Abdelzaher, T.F.: Smartroad: Smartphone-based crowd sensing for traffic regulator detection and identification, ACM Trans. Sensor Networks, Vol.11, No.55, (2015).

[2] Luo, C., Hong, H., Cheng, L., Sankaran, K. and Chan, M.C.: iMap: Automatic inference of indoor semantics exploiting opportunistic smartphone sensing, Proc. IEEE International Conference on Sensing, Communication, Networking, (2015).

[3] 高木 雅，藤本 浩介，川原 圭博，浅見 徹：スマートフォンを用いた電気自動車およびハイブリッド車の接近検知手法，情報処理学会研究報告，vol.2014-UBI-43, No.12, (2014).

[4] Takagi, M., Kawahara, Y., and Asami, T.: A Low-Power Sensing Method Using Linux Kernel on Android Devices," Proc. ACM Conference on Embedded Metworked Sensor Systems, pp.413-414, (2015).

[5] 高木雅，川原圭博，浅見徹：リカバリーモードを用いた省電力なセンシング 9 おける Android 端末と外部機器の連携手法，電子情報通信学会総合大会講演論文集，(2016).

[6] Shinohara, N.: The wireless power transmission: inductive coupling, radio wave, and resonance coupling. Journal from Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, Vol.1, No.3, pp-337-346, (2012).

[7] Xiao, L., Ping, W., Dusit, N., Dong, I.K. and Zhu, H.: Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey(online), available from <https://arxiv.org/pdf/1406.6470.pdf >(accessed 2016-10-02).

[8] Tektronix: The 2400 Series SourceMeter Source Measure Unit (SMU) 2450 datasheet (online), available from <http://jp.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/2450-DataSheet_jp.pdf>(accessed 2016-09-15).

[9] Powercast, (online), available from<http://www.powercastco.com/>(accessed 2016-10-02)

[10] Powercast: P2110 Datasheet(online), aviable from <http://www.powercastco.com/test566alpha/wp-content/uploads/2009/03/p2110-datasheet-rev-b.pdf>(accessed 2016-09-15).

[11] Zhang, L., Liu, J., Jiang, H. and Guan, Y.: SensTrack: Energy-Efficient Location Tracking With Smartphone Sensors, Journal from IEEE Sensors, Vol.13, No.10, pp.3775 - 3784, (2013).

[12] 安倍恵一，水野忠則，峰野博史：周期的センシングアプリケーション向け省電力型無線センサノードの開発, 情報処理学会論文誌，コンシューマ・デバイス&システム，Vol.2, No.1, pp.48-57, (2012).

[13] Minami, M., Morito, T., Morikawa, H. and Aoyama, T.: Solar Biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications, Proc. International Workshop on Networked Sensing Systems, (2005).

[14] Peter, C., Philip, V., Pavan S., Tim, W. and Les O.: Long-Duration Solar-powered Wireless Sensor Networks, Proc. workshop on Embedded Networked Sensors, pp33-37, (2007)

[15] Google: Android open source project(online), available from <https://source.android.com/>(accessed 2016-09-20).

[16] AVX: BestCap supercapacitors datasheet (online), avaiable from <http://datasheets.avx.com/BestCap.pdf >(accessed 2016-09-15).

[17] Murata: EDLC DFM series datasheet (online), aviable from <http://www.murata.com/ja-jp/products/productdata/8796857335838/MFCDSF2J.pdf?1457753427000>(accessed 2016-09-15).

[18] Powercast: TX91501 User's Manual(online), aviable from <http://www.powercastco.com/test566alpha/wp-content/uploads/2009/03/tx91501-manual.pdf>(accessed 2016-09-15).