

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21284

研究課題名（和文）IoT向け小体積無線通信回路の性能限界解明と、最適回路構造の決定

研究課題名（英文）Analysis and Development of Optimal Circuit Structure for Small Volume Wireless Communication Circuits for IoT

研究代表者

白井 僚（Shirai, Ryo）

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：70910834

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、IoT機器において大きな面積を占める、無線給電機能と無線通信機能について、両者で回路構造の一部を共有することで、センサデバイス全体の小体積化を図る構造を提案した。無線通信回路は通常、電磁波の生成に必要な発振回路が大きな電力を消費する。一方、提案手法は、発振回路を使用せずに、情報をやり取りする機構を開発することで、低消費電力化を実現した。提案手法をシミュレーションと実機で評価したところ、小体積化と無線通信の低消費電力化を両立可能なことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の無線通信の研究は先行研究に対して性能改善を繰り返す手探りの研究であり、非効率的であった。一方で本研究は、電磁理論と回路理論に基づいて、通信回路の性能限界を解明しようと図るものである。本研究期間内で、理論に基づいて、体積の大きな回路や消費電力の大きな回路を利用せずに無線通信が可能であることを示した。今後、本研究を進め、複数の回路について理論的な性能限界を解明することで、世界中の小体積無線通信回路の研究に対して、回路設計の技術的指針や、目標性能の基準を示すことができる。

研究成果の概要（英文）：This work proposed structures of small wireless sensors suitable for IoT applications. The volume of conventional IoT devices cannot be reduced beyond a certain degree due to the volume consumed by wireless communication and power circuits. To address this issue, this work proposed a circuit structure that shares the volume-consuming part between the wireless power and communication functions. Regarding power consumption, conventional circuits consume a significant amount of power to operate the oscillation circuit required for wireless communication. To overcome this issue, this work proposed a wireless communication mechanism that does not require an oscillation circuit. The simulation and experimental results showed that the proposed structures successfully achieve lower power consumption and a smaller implementation volume.

研究分野：回路とシステム

キーワード：無線通信回路 磁界結合 電磁界 無線給電

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の科学技術政策の一つである Society 5.0 構想は、IoT ( Internet of Things )によって全ての人とモノを情報ネットワークに接続し、得られたあらゆる情報を活用することで、我々の生活環境向上を図るものである。本構想の実現に向け、通信・電源ケーブルが不要で、設置場所の制約がない小体積無線センサデバイスが盛んに研究されている。これは近年、小体積かつ高性能な半導体デバイスの実現が可能になったという背景を反映している。一方で小体積デバイスは体積の制約からバッテリー容量が少なく、消費エネルギーの最小化が必要である。その際の課題は、センサ回路の中でも特にエネルギー消費の激しい無線通信回路をいかに省電力化するか、という点にある。無線通信回路を小型化すると、図1に示す通りアンテナの体積が制限され電磁波の放射効率が低下するため、通信のエネルギー効率が悪化する。また、デバイスの小体積化に起因する信号の高周波数化は、消費エネルギーの増大と通信可能距離の短距離化を招く。国内外の多くの研究者が小体積で高エネルギー効率な無線通信回路を研究しているが、未だに最適な回路構造等の解明には至っていない。

#### センサデバイスの小型化

<b>バッテリー体積</b>	大きい	小さい
蓄積エネルギー	多い ✓	少ない ✕
<b>アンテナ体積</b>	大きい	小さい
電磁波放射効率	高い ✓	低い ✕
<b>使用周波数</b>	低い	高い
消費エネルギー	小さい ✓	大きい ✕
通信可能距離	遠距離 ✓	近距離 ✕

図1: 無線通信回路の小型化に伴う課題

図1に示す通りアンテナの体積が制限され電磁波の放射効率が低下するため、通信のエネルギー効率が悪化する。また、デバイスの小体積化に起因する信号の高周波数化は、消費エネルギーの増大と通信可能距離の短距離化を招く。国内外の多くの研究者が小体積で高エネルギー効率な無線通信回路を研究しているが、未だに最適な回路構造等の解明には至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究では最終的に、無線通信回路の理論的性能限界を解明することを主たる目的とする。また、無線通信回路の小体積 IoT センサへの搭載を前提に最適な回路方式を解明し、実機検証を行うことを目的とする。そのために研究期間内に以下の2点を明らかにする。

- (1) 通信性能劣化が不可避なアンテナ小型化以外の手法で、回路の小体積化を図れないか。
- (2) 無線給電機能や、ノードが自ら必要電力を発電するエナジーハーベスティング機能といった、実装体積が大きな他機能と相性がよい無線通信の回路構造は何か。

上記(1)、(2)を明らかにすることで、体積制約が存在するアプリケーションにおいて、高性能な無線通信性能を発揮可能な構造を理論に基づいて明らかにする。

### 3. 研究の方法

前項目(1)および(2)を同時に実現するために、本研究では、無線給電機能と無線通信機能とで、回路構造の一部を共有することで、センサデバイス全体の小体積化を図ることが可能な構造の実現と、評価を行う。

(1) 小体積で通信可能な手法として、コイル間の磁界結合を利用した通信方式が考えられる。通常の無線通信では、効率的な電磁波の放射のために体積の大きなアンテナを必要とする。一方、磁界結合式の通信は、アンテナを必要としないため、小体積実装が可能である。本研究では、回路構造の一部を共有することで、無線給電と、磁界結合式無線通信を小体積で行う手法を実現し、評価する。

(2) (1)で実現する磁界結合式の無線通信は、送信コイルと受信コイル間の磁界結合が微小な場合において、通信ができないという欠点を持つ。そこで、本項目では、無線給電で受け取ったエネルギーの一部を、発振回路を使うことなく、別の周波数の電磁波に変換する構造を提案する。無線通信回路中で大きな電力を消費する発振回路を不要化しつつも、電磁波を利用した通信を可能にすることで、小体積化と低消費電力化、そして通信距離の長距離化を同時に実現する。

### 4. 研究成果

(1)磁界結合式の無線通信では、コイル間の磁界結合を通じて、情報を伝達する。このコイル間の磁界結合の度合いは結合係数 $k$ で表す。通常の磁界結合式の無線通信や無線給電の研究では、結

合係数が概ね  $k > 0.1$  となるような環境を想定している．一方，本研究で対象とする小体積デバイスにおいては 結合係数は概ね  $k < 0.01$  となるため，従来の無線給電や磁界式無線通信の回路は利用できない．そこで，図2に示すような，無線給電と磁界式無線通信を同時に実行する回路構造を提案した．図2中の送電ノードは，通信ノードにエネルギーを供給する役割を持つ．送電ノード中の交流電源は，送電コイル  $L_t$  に交流電流を流すことで，送電コイルに交流磁界を生成させる．通信ノード中のコイル  $L_r$  は，送電コイル  $L_t$  と，結合係数  $k$  で結合している．送電ノードから受け取ったエネルギーをキャパシタ  $C_{st}$  に蓄え，蓄えたエネルギーを利用してトランジスタ Q1 のゲート電圧を制御する．通信ノードの動作を，図3を利用して説明する．通信ノードは当初， $V_{gs}$  を高電位にすることで，Q1 を導通状態とする．送電コイルと受電コイルは磁氣的に結合しているため， $L_r$  と  $C_r$  からなる LC 回路にエネルギーが蓄えられ， $I_{L_r}$  の振幅が時間とともに大きくなる．通信ノードは， $I_{L_r}$  が十分に高電流となった時に， $V_{gs} = 0$  とすることで，Q1 を非導通状態とする．すると受電コイル  $L_r$  に流れている電流は逆流防止ダイオード D1 を通り，キャパシタ  $C_{st}$  に流れ込むため，エネルギーがキャパシタ  $C_{st}$  に蓄えられる．同時に電流  $I_{L_r}$  の大きさは高電流状態から急峻に0に近づくため，受電コイル  $L_r$  は瞬間的に大きな磁束の変化をもたらす．これにより，送電コイルを貫く磁束量が大きく変動するため，送電コイルを流れる電流に変化が生じる．通信ノードにおけるゲート電圧  $V_{gs}$  の変化を，送電側コイルを流れる電流量の変化として読み取ることができる．通信ノードは， $V_{gs}$  を送信したい情報に応じて変化させることで，送電ノードに情報を送信することができる．通信ノードとして，19mm 角のデバイスを試作し，提案手法を実機により評価したところ，結合係数が  $k = 0.00783$  の場合に，750 $\mu$ W の無線給電と，116.95kHz の無線通信が実現可能であることが明らかになった．

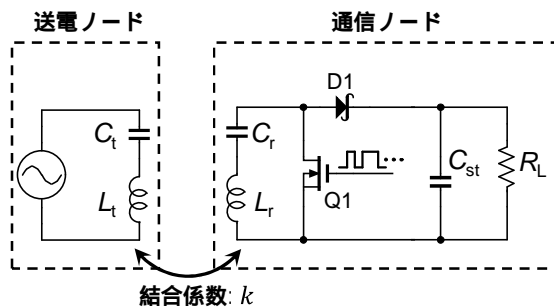


図2: 磁界式無線通信と無線給電を同時に実現可能な回路構造．

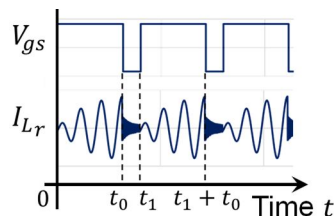


図3: 提案構造におけるスイッチング波形．

(2) (1)で実現した構造は，送電ノードと通信ノード間の距離が数メートル以上になると，送電コイルと受電コイル間の結合係数が極小となり，無線通信ができなくなる．そこで，より遠距離の通信に対応するため，図4に示す構造を提案した．SW1を閉じているとき，通信ノードは， $L_r$  と  $C_r$  からなる LC 回路にエネルギーを蓄える．LC 回路に十分なエネルギーを蓄えた後，SW1を開き，SW2とSW3のいずれか一方を閉じることで，LC回路の共振周波数を変化させる．SW2とSW3のいずれかを閉じることで，図5に示すように高周波電流が受電コイル  $L_r$  を流れる．ここで，SW2を閉じた場合，高周波電流の周波数  $f_1$  は  $f_1 = 1/2\pi\sqrt{L_r C_1}$  となり，SW3を閉じた場合，周波数は  $f_2 = 1/2\pi\sqrt{L_r C_2}$  となる．受電コイル  $L_r$  を流れる高周波電流  $I_{L_r}$  により，電磁波が生成される．以上の仕組みにより，提案手法は，消費電力の大きな発振回路を使用することなく，高周波電磁波を生成することができる．本提案手法をシミュレーション評価したところ，1ビット当たり 50.9pJ のエネルギー消費で電磁波を生成できることを確認した．

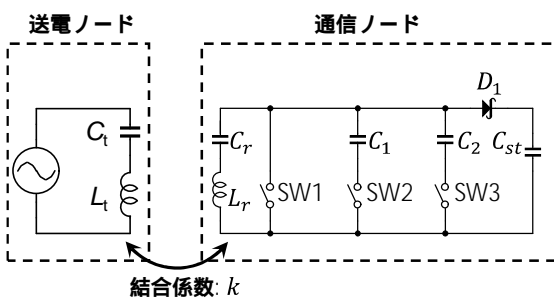


図4: 無線給電により受け取ったエネルギーの一部を電磁波に変換する回路構造．

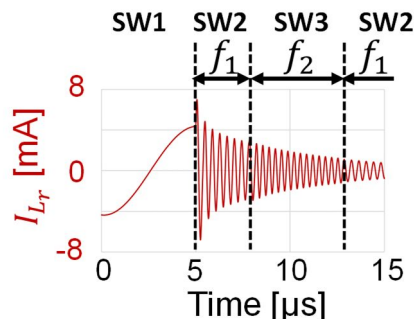


図5: 提案構造における電磁波生成の様子．

今後の課題として，(1)および(2)の手法を，実際の利用ケースに合わせて実機評価し，ビット誤り率や，通信可能距離の評価を行うことが挙げられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryo Shirai , Masanori Hashimoto
2. 発表標題 Shape-Flexible Underwater Display System with Wirelessly Powered and Controlled Smart LEDs
3. 学会等名 27th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '22 Companion) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白井 僚 , 森 聖太 , 渡辺 悠介 , 中村 柚希 , 橋本 昌宜
2. 発表標題 360度視野角を有する3Dディスプレイの実現に向けた極小画素ドットへの水中無線給電技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 侑希大 , 白井 僚 , 橋本 昌宜
2. 発表標題 小体積 IoT ノード向け磁界式バックスキップ通信手法の提案と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福ヶ迫 遼太 , 福島 慶大 , 木村 侑希大 , 白井 僚 , 橋本 昌宜
2. 発表標題 コイル間磁界結合が極小時に高効率無線給電を実現する電流チョッパ制御技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 稲森 康太, 白井 僚, 橋本 昌宜
2. 発表標題 360 度視野角を有する水中 3D ディスプレイの実現に向けた mm <sup>3</sup> 級画素ドットへの無線給電・通信手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 稲森 康太, 白井 僚, 橋本 昌宜
2. 発表標題 360 度視野角を有する水中 3D ディスプレイの実現に向けた mm <sup>3</sup> 級画素ドットへの無線給電・制御技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 播磨屋 稔, 白井 僚, 橋本 昌宜
2. 発表標題 高並列化可能な三次元フィルタ技術を用いた物体内部点群からのリアルタイム形状再構成
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 既知の磁性体異物にロバストな直流磁界を用いた解析的位置推定
2. 発表標題 田中 稔久, 白井 僚, 橋本 昌宜
3. 学会等名 電子情報通信学会 集積回路研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Harimaya, Ryo Shirai, Masanori Hashimoto
2. 発表標題 Toward Instant 3D Modeling: Highly Parallelizable Shape Reproduction Method for Soft Object Containing Numerous Tiny Position Trackers
3. 学会等名 28th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関