

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22680004

研究課題名(和文) 無線電力伝送によるパーペチュアルセンサネットワークに関する研究

研究課題名(英文) Research on Perpetual Wireless Sensor Networks enabled by Wireless Power Transfer

研究代表者

川原 圭博 (Kawahara, Yoshihiro)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：80401248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円、(間接経費) 5,370,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、無線センサネットワークの実用化の障壁になっているエネルギー供給問題に対して、電磁界共振結合技術を用いた無線電力伝送技術を適用し、データだけでなく電力もセンサノード間で転送し合う新しい情報インフラを提案した。このコンセプトを実現するためのマルチホップ型電力伝送について、共振器の設計手法、インピーダンス整合手法について理論構築とその実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at realizing a new information infrastructure that allows sharing energy among sensor nodes as well as data. This system solves the energy supply problem that is considered as a barrier to penetrate wireless sensor networks. We have established a theory to design a resonator and match the impedance of the resonators. We also showed the performance of a modulation scheme that allows to send the data and power simultaneously.

研究分野：計算機システム

科研費の分科・細目：ネットワーク

キーワード：センサネットワーク 無線電力伝送

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークとは、温度や明るさ位置情報といったセンサを搭載した無線通信機能付き超小型計算機(センサノード)を環境中に遍在させ、ノード同士がアドホックネットワークを形成し、データをルーティングする自律分散システムである。こうしたネットワークによるセンシングは、自然環境モニタリングから、人流・物流計測、建築物の健全性評価等さまざまな産業分野での応用が期待されているが、運用コストの高さが障害となり実用に至っていない。センサネットワークの構成ノードは、搭載バッテリー容量に限度があるなかで、センシングのほかに他のノードのデータ通信の中継も行わねばならない。この電源制約が長期間の運用の障害になっており、これまでにデータリンクやルーティング、データ集約方式を工夫し、ノードのスリープ時間を長くすることで電池交換サイクルを減らす研究提案が数多くなされてきた。

2. 研究の目的

本研究は、無線センサネットワークの実用化の障壁になっているエネルギー供給問題に対して、電磁界共振結合技術を用いた無線電力伝送技術を適用し、データだけでなく電力もセンサノード間で転送し合うことで系としての長寿命化を目指すことを目的とする。

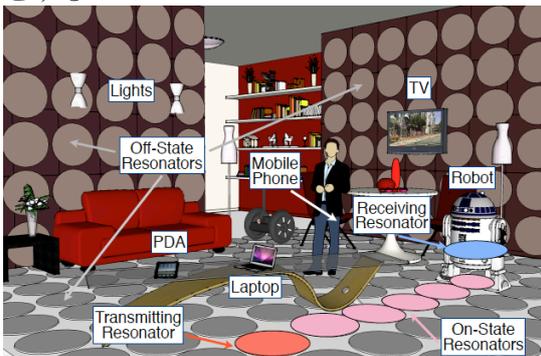


図1 コンセプト

具体的には図1に示すように給電できるメディアとなる中継共振器を多数配置し、この平面上でセンサデバイスが情報とエネルギーを交換するようなモデルを考える。

3. 研究の方法

図1に示したコンセプトを構成する要素技術を以下に示す。

1) ハードウェア技術

電磁界共振結合技術による無線電力伝送用ヘリカルアンテナ(10MHz程度)を用いて必要に応じてエネルギーを送受する。エネルギーの送信ノードには信号発生器とアンプを搭載し、受信ノードには整流回路と蓄電素子を配置する。

2) ノード配置アルゴリズム 無線電力伝送方式は現在開発段階であり、配置制約が存

在する。アンテナ同士の距離が離ればばアンテナ同士の結合度が低下し効率が低下する。そして、アンテナには指向性が存在し、また、ある程度以上ずれても効率が低下する。したがって、送電量、密度や向きの制約を考慮したノード配置戦略が必要になる。

3) エネルギールーティング技術 個別のノードの電力蓄積状況だけでなく、ネットワーク全体としてどのように電力を送り届けるべきであるかといったエネルギーの割当問題を、局所的な情報だけで解く、自律分散的な「エネルギールーティング」アルゴリズムを確立する。

本研究はデータのルーティングだけでなく、エネルギーのルーティングという新しいコンセプトを導入する点が、従来のコンピュータネットワークに無い特色であり、独創的な点である。

4. 研究成果

・共振器設計手法とマルチホップ化

電力伝送のエネルギー伝達の媒体となる共振器について、ヘリカル型、スパイラル型、二重スパイラル型の3種類の形状についてモデルを作成し、長短を論じた。ヘリカルは厚みがある代わりにQ値の高い共振器を作ることができる。逆にスパイラルは薄さが特徴となる。二重スパイラルは高さに応じてその中間的な性質を持たせることが可能になる。これにより共振器の厚さと伝送効率のトレードオフ等を定量的に論じることが可能になった。

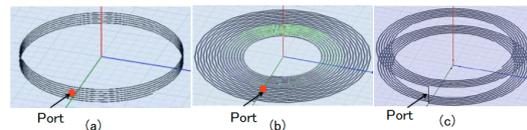


図2 (a)ヘリカル (b)スパイラル (c)二重スパイラル

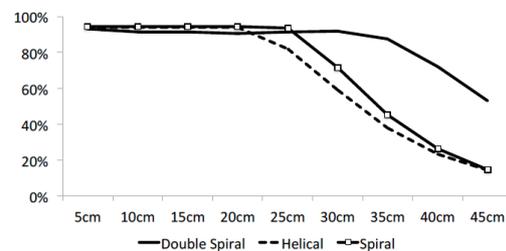


図3 ピーク伝送効率の比較

送受電共振器間の距離が大きくなるに従って、伝送効率が悪くなっていくことが知られている。より長い距離を伝送するためには、2つの共振器間に複数の中継共振器を挿入することが、伝送距離を伸ばす上で有効である。そこでマルチホップ化の概念を他に先駆けて提案し、その特性解析を行った。提案システムでは、エネルギーが送電共振器、中継共振器、受電共振器の順番で伝達される。

中継共振器は、送電や受電に用いる共振器と同じものであるが、ポート部分はショートさせてある。ポート部分をオープンとすることによって、中継共振器の機能を果たせなくなり、他の共振器に対する影響を小さく抑えられることが分かっている。直線状の多段化に関しては、提案した設計手法により、共振器の自己共振周波数において高効率給電可能である。また中継共振器を直線状に挿入するだけでなく、中継共振器をアレイ化することによって伝送効率の向上が可能であることも示した。

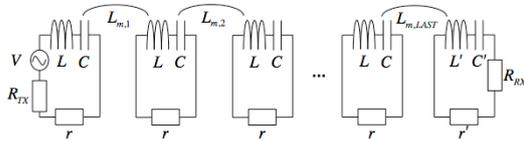


図 4 N ホップ無線電力伝送の等価回路

共振器を N 個並べたとき、そのエンドエンドの電力伝送効率は必ずしも自己共振周波数において最大効率を取るとは限らないことが明らかになった。この問題はホップ数を変化させたときにさらに問題となる。本研究では図 4 のような透過回路を設定し、これがホップ数 N によらず常に電源と負荷のインピーダンスが一致するような条件を求めることによって自己共振周波数での伝送効率最大化の条件を求めた。

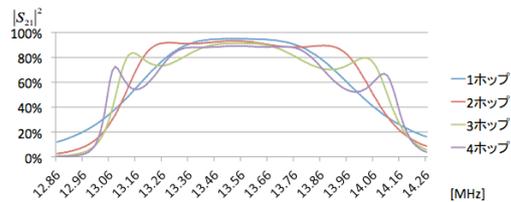


図 5 マルチホップ時のインピーダンスマッチング適用後の測定結果

図 5 に示すように、ホップ数 N によらずシミュレーションにおいても実測においても極めて高い伝送効率を実現できることが明らかになった。

・ マルチホップ時のインピーダンスマッチング

位置ずれに強い無線電力伝送方式の実現を目指し、共振器の配置方法の検討を行った。共振器の電流分布をもとに設計する新たな設計手法を示した。

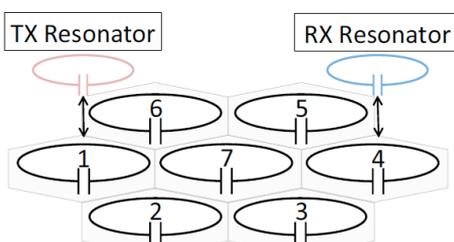


図 6 電流分布を考慮した共振器設計

位置ずれに強い無線電力伝送シートを実現するためには、同一の共振器を等間隔に多数敷き詰め、全ての共振器の電流を均一にする必要がある。共振器間の磁気結合は距離の 3 乗で減衰するため、隣り合う共振器同士の成分が支配的である。位置ずれに強いシステムを実現する場合、できる限り隙間無く共振器を敷き詰めるべきであるから、共振器を三角格子状に敷き詰めるのが適当である。この場合隣接する共振器の数は 1 から 6 までの 6 種類しかあり得ないため、それぞれに応じた共振器を予め作成しておき、それらを適切に配置することによって、ユーザが最適化した任意の形状の無線電力伝送シートを作成することが可能である(図 6)。

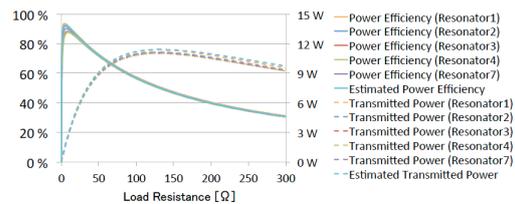


図 7 共振器ごとの伝送効率

伝送電力は 10 Ω あたりで最大となっている。しかしながら、伝送電力は受電共振器の位置により大きく異なる。負荷が 40 Ω 以上であれば、位置による伝送電力の差異は小さい。ゆえに伝送電力を含めて位置によらない給電を実現するのであれば 40 Ω を用い、電力効率を最優先するのであれば 10 Ω 程度を用いるのが良い。また、負荷が 40 Ω のときには各共振器での損失は伝送電力の約 4.5%程度であるため、理論上 22 個の共振器を敷き詰めたとしても 50%以上の効率が実現できる。

各モジュールの接続には電氣的接点が多く、磁界共振結合により無線給電シートを構成するため、シートから端末群に給電できるだけでなく、端末から端末群への給電も可能であるという特徴がある。ゆえに残余電力量の多い端末から充電を必要とする端末群に電力を融通することも可能となり、すなわち、電力の共有基盤として利用できる画期的な仕組みであると言える。

LTspice を用いた回路シミュレーションの結果は、無線電力伝送シートの有効性、実現可能性を示しており、シミュレーションに用いたパラメータにおいては効率 50% 以上で給電できる面積は最大 3.4m² 程度であると分かった。

・ 多値 ASK 通信方式

他の無線通信の伝送路に比べて入力値への追従性(速応性)に乏しく、出力波形が定常状態に達するまでに、無視できない時間的な遅れが生じる(図 8)。ASK での通信を想定した場合、一定以上のシンボルレートにおいて立ち上がり不十分となり、シンボル間干渉(ISI)によるシンボルエラーが高頻度で起

こる可能性を示唆している。特に伝送範囲を拡大するマルチホップシステムにおいてはホップ数に応じてこの速応性の度合いが変化する。

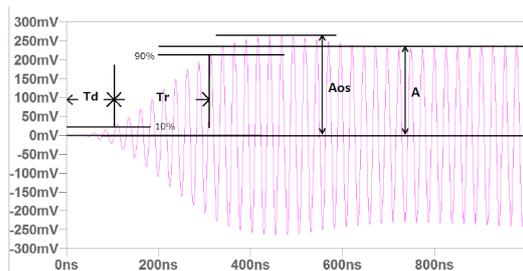


図8 共振器を使ったASKにおける立ち上がり整定時間

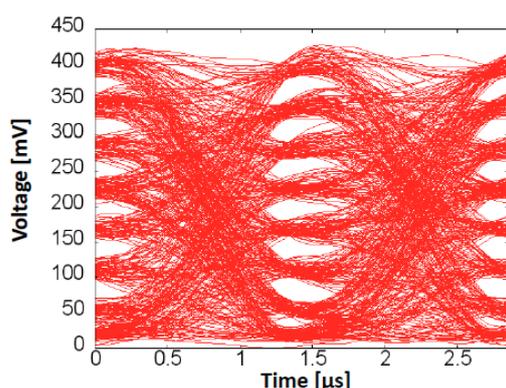


図9 多値ASKによる電力伝送と通信の両立

ホップ数3で変調方式が8値ASKの場合のシンボルレート700[kilobaud]の受信信号アイパターンを図9に示す。8段階の各電圧値の間の7つの目が十分に開口しており、良好な通信が行われていることが分かる。

本研究では共振器を直線上に等間隔で配置したマルチホップ下において電力伝送と同時にデータ通信を行うことを想定し、同システム上での多値ASKの実装・および実験による性能評価を行った。実際の共振器を用いて、電力だけでなく、データを高効率で伝送できることを示すことができた。

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1件)

- 1) Wei Wei, Yoshihiro Kawahara, Naoki Kobayashi, Tohru Asami, "Characteristic Analysis of Double Spiral Resonator for Wireless Power Transmission," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*,

Vol62, Issue1, pp.411-419, Jan. 2014.

[学会発表] (計13件)

- 1) Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M. M. Tentzeris, and T. Asami, "Power Harvesting from Microwave Oven Electromagnetic Leakage," *The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 2013)*, pp. 373-382, Zurich, CH, Sept. 2013.
- 2) 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, "Hercules: 平面上での無線電力共有実現のための再構成可能な磁界共振結合モジュールの設計," *情処研報*, 2013-UBI-39, No.2, pp.1-8, July 2013 (学生奨励賞受賞).
- 3) W. Wei, Y. Kawahara, T. Asami, "Experimental Analysis of Double Spiral Resonator for Wireless Power Transmission," *Proc. IEEE WPTC*, pp.9-12, Perugia, Italy, May 2013.
- 4) Y. Kawahara, W. Wei, Y. Narusue, R. Shigeta, T. Asami, M. Tentzeris, "Virtualizing Power Cords by Wireless Power Transmission and Energy Harvesting," *Proc. IEEE Radio Wireless Week*, pp. 37-39, Austin, TX, U.S.A., Jan. 2013.
- 5) Y. Narusue, Y. Kawahara, T. Asami, "Impedance Matching Method for Any-Hop Straight Wireless Power Transmission Using Magnetic Resonance," *Proc. IEEE Radio Wireless Week*, pp. 193 - 195, Austin, TX, U.S.A., Jan. 2013 (Best Student Paper Finalist).
- 6) 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, "中継器を伴う磁界共振結合型無線電力伝送のためのホップ数可変インピーダンス整合手法," *信学技報*, WPT2012-11, pp.9-14, July 2012.
- 7) W.Wei, T. Miyasaka, Y. Kawahara, T. Asami, "Maximizing Wireless Power Transmission Efficiency with Linear Deployment Resonator Array and Band Pass Filter Theory," *Adjunct Proc. of Pervasive 2012*, -, Newcastle, UK, June 2012.
- 8) Y. Kawahara, "System Design for Energy Harvesting Wireless Sensor

Networks,” Proc. IEEE International Microwave Symposium, Workshop Proceedings, June 2012 (Invited Talk).

- 9) W. Wei, Y. Narusue, Y. Kawahara, N. Kobayashi, H. Fukuda, T. Tsukagoshi and T. Asami, “Characteristic Analysis on Double Side Spiral Resonator’s Thickness Effect on Transmission Efficiency for Wireless Power Transmission,” 信学技報, WPT2012-01, pp.1-5, May 2012.

- 10) 澤上佳希, 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見徹: "磁界共振結合式マルチホップ無線電力伝送方式の解析と評価" 情報処理学会 マルチメディア,分散,協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2010). (20100707). 水明館(岐阜県)

- 11) 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見徹: "エナジーハーベスティング WSN における電力管理手法が通信特性に与える影響の検討" 情報処理学会 ユビキタスコンピューティング研究会. (20100715). 筑波大(茨城県)

- 12) 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見徹: "磁界共振結合による二次元無線電力伝送方式における仮想パス制御方式" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会. (20100914). 大阪府立大(大阪)

- 13) 宮坂拓也, 川原圭博, 浅見徹: "エナジーハーベスティング WSN における電力管理手法が通信特性に与える影響の検討" 電子情報通信学会 総合大会. (20110316). 東京都市大(東京都)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 無線電力伝送装置

発明者: 浅見徹, 川原圭博, 宮坂拓也, 澤上佳希, 西本寛

権利者: 東京大学

種類: 特許願

番号: CAP10012

出願年月日: 2010年8月30日

国内外の別: 国内

名称: 電力供給装置

発明者: 小林 直樹, 福田 浩司, 成末 義哲, 川原 圭博, 浅見 徹

権利者: 日本電気, 東京大学

種類: 特許願

番号: PCT/JP2013/073237

出願年月日: 2013年8月23日

国内外の別: 国際

[その他]

ホームページ等

<http://www.akg.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

川原圭博 (東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授)

研究者番号: 80401248