

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280027

研究課題名(和文) デジタルファブリケーションと情報科学的アプローチの融合による無線WSN設計

研究課題名(英文) Design of wireless sensor networks enabled by fusion of a digital fabrication technology and an information scientific approach

研究代表者

浅見 徹 (Asami, Tohru)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：00436560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルファブリケーション技術と情報科学的アプローチを融合することにより、アンテナやセンサ電子回路といったデバイスの設計を高速化するためのプラットフォームを造ることに成功した。まずインクジェット印刷による電子回路の印刷と高周波特性測定を繰り返し可能な装置を作成した。この装置を元にユーザインタフェースへの応用やマイクロ波エネルギーハーベスティング用のアンテナ設計や、共振型無線電力伝送用における遺伝的プログラミングを用いた設計手法が有効かつ実用的であることを示した。

研究成果の概要(英文)：As a means to integrate digital fabrication technology and information scientific approach, a rapid prototyping platform for electrical circuit elements such as antenna and sensors is developed.

The platform includes an equipment that makes it possible to print electrical circuits using inkjet-printing and measure the high-frequency characteristics of the device under test repeatedly. Design methods based on the genetic programming based approach are proved to be effective and practical for applications including user interfaces, microwave energy harvesting antenna and resonance-based wireless power transmission.

研究分野：情報通信工学

キーワード：高速プロトタイピング 無線センサネット

1. 研究開始当初の背景

無線電力伝送のアンテナや静電容量センサなど電磁界現象に基づくデバイスを設計する場合、勘と経験から得られた基本設計パターンを元にシミュレーションを繰り返すことで最適な設計パターンを得るのが常套手段である。昨今、市販の物理シミュレーションツールは、一昔前と比べて格段に高速な解析が可能になっているものの、それでもなお、100GB以上のメモリを搭載した最新のワークステーションでも一組のパラメータの解析に10時間以上時間を要することが稀ではない。通常、アンテナやセンサの設計では、複数のパラメータを局所最適に陥ること無く最適化する必要がある。例えば最も基本的なパッチアンテナでは各種のパラメータを変化させ、アンテナゲインを最大化するという問題を解かなければならない。シミュレーションで最適な解が求まったとしても、実際、アンテナを実装する工程に基材の厚みのばらつきや誘電率のずれがあると、放射効率と有効帯域の違いが生じ、結果としてシミュレーションでの最適化が無駄になることも珍しくない。さらに言えば、シミュレーションの条件を正しく求めることも難しい問題を孕んでいる。これまでは知識と経験をフル活用して、シミュレーションでなるべく最適な形状を求めることで、試作の回数を減らすことが定石であった。昨今、デジタルファブリケーション技術の登場により、極めて短時間であらゆるモノをプロトタイプ可能になった。たとえば3Dプリンタの登場により、鋳型を起こすことなく、3次元CADソフトで描いた立体物を、即座に形成可能である。そして、レーザーカッターを用いると紙や布、フィルム、そしてアクリル板やベニヤ板をパソコンソフトで描画した任意の形状に切り抜いたり彫刻したりすることが可能である。

申請者らはこれまで、家庭用インクジェットプリンタ用に粘度と表面張力を調整した銀ナノインクを用いて、写真用紙やPETフィルム上に高導電性パターンを精細に印刷することに成功した。製紙メーカー、ジョージア工科大学、マサチューセッツ工科大学と共同で、電子回路用基板パターンやタッチセンサ、アンテナの実装にも成功した。導電性インクを用いた回路基板印刷技術は、市場でも急速にシェアを伸ばしているが、スクリーン印刷を用いる場合は高価なマスクを製作する手間を要し、産業用インクジェットプリンタを用いる場合は、ヘッドの動きとノズルを数 μm 単位で精密に制御できる代償として印刷速度が遅く、A4のパターンを印刷するのに10時間以上要する。さらに導電性を持たせるためには印刷後140 $^{\circ}\text{C}$ 程度で4時間以上焼結が必要であるなど、プロトタイプングには向かない。家庭用インクジェットプリンタといえど、数十 μm の精度での印刷が可能であり、アンテナやセンサを描画するには十分な精度を有している。A4サイズの印

刷は数分で完結し、精度の個体差もほとんどない。インクジェットプリンタは現在一台一万円以下で購入でき、現時点のインクコストもA4一枚50円程度である。印刷後のシート抵抗値も0.1-0.4 Ω/sq 程度と、高い導電性を要するアンテナの実装にも申し分ない。インクジェット印刷を用いるからといって水に弱いわけではない。ラミネートコーティングを施すことで酸化を防いだり耐水性を持たせることもできる。厚みのある硬い基材への印刷も本質的に可能である。そして、既存の銀ナノインクと異なり化学焼結が可能で、印刷後数十秒以内に導電性が発現する点が今回最も特筆すべき点でもある。従来と比較して1/100以下の時間でアンテナやセンサ、回路を印刷可能なため、新たなデジタルファブリケーションツールとして大きな期待が寄せられている。また廉価に構築できるため、製作プロセスの並列化にも向いているとも言える。

2. 研究の目的

本研究は、デジタルファブリケーション技術と情報科学的アプローチを融合することにより、通信用アンテナやセンサ、電子回路といったユビキタスデバイスの設計プロセスの劇的な高速化を目指す。具体的には、例えばアンテナを設計する際に、あらかじめ候補となるパターンを遺伝的アルゴリズムといった進化的手法を用いて複数生成し、時間を要するシミュレーションの代わりに導電性インクを用いた高速インクジェット印刷技術を用いて即座に描くことで性能を評価する。描かれたアンテナパターンの性能を順次実測することで、すべて入念な電磁界シミュレーションを行う場合と比較して100分の1以下の短時間で性能が最適化されたアンテナの製作を行うことが可能になると期待できる。

3. 研究の方法

これまでに開発した家庭用インクジェットプリンタと銀インクを用いたアンテナ及びセンサの実装プラットフォームを拡張することで、自動印刷、自動計測、そして並列印刷を行うフローを確立する。ワークステーションを用いてパターンを生成し、廉価なインクジェット印刷機を用いて迅速に並列印刷を行う装置を実装する。

そして、現実世界において重要な各種アプリケーションに対してこの手法を適用し、その有効性について論じる。

4. 研究成果

(1) インクジェット印刷による電子回路印刷プラットフォームの実装

家庭用インクジェット印刷を用いて様々な電子回路を印刷し、その高周波回路の特性を速やかに測定するためのプラットフォームの開発を行った。印刷した素子パターンを

ステージ上に搭載し、プローブステーション上の探針を平面上で自由に動かせる機構を設計することでベクターネットワークアナライザやリアルタイムオシロスコープを用いた解析ができるようになった。

(2) ユーザインタフェース応用

時間領域の信号反射を用いたタッチセンサを作成するソフトウェアを本基盤を用いて製作した。自己相似の特徴を持つ疑似ヒルベルト曲線を任意のポリゴン中に満たすアルゴリズムを考案した。これにより折り紙の要領で立体的な構造の表面を覆うようなタッチセンサを作ることが可能になった。大判プリンタを使って大規模回路を印刷することにより、空間内に感圧パターンを張り巡らせることも可能になる。

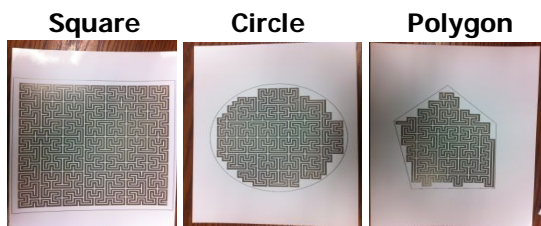


図 1 疑似ヒルベルト曲線によるタッチセンサの作成

(3) マイクロ波 Energy Harvesting 応用

RF Energy Harvesting は電力源として環境中に存在する電波などを電力源として微小電力を取り出し低消費電力マイコンを運用する技術である。絶対量は小さいが太陽光などと異なり比較的長時間変動が少ないことからセンサなどの稼働には有利である。電磁波から直流エネルギーを変換するにはアンテナと整流回路を組み合わせたレクテナが使われる。整流回路とアンテナはある正弦波が入力された時の条件の元で設計されるのが普通であるが、実際の環境中の電磁波の強度は周波数的に広がりを持ち時間変動もあるような変調された電磁波である。そこで実利用条件下でのあらゆる条件を満たした形でのシミュレーションを事前に行うことはほぼ不可能に近い。そこで本稿では、インクジェット印刷技術を用いてアンテナを短時間で実装し、実測値を用いて評価することにより、高速な設計を実現するアンテナ構造最適化手法を提案した。評価指標が直接シミュレーションで得られない場合には、複数の指標によって間接的に評価を行うしかなかったものの、提案手法では実機評価を用いるため、受電電力や受信電圧などの比較的容易に測定が可能なパラメータであれば、正確な結果を用いて各個体を評価できる利点も有する。本稿では実用性の評価のために、この手法を用いた地上テレビ放送電波をハーベスト用のアンテナを設計した。提案手法の有効性を確認するため、今回は、東京スカイツリーと東京タワーから放射される地上デジタル TV

放送電波からエネルギーハーベスティングによって得られる受信電力が最大となるようなアンテナを設計した。ダイポールアンテナのエレメントを 6 つのパラメータで表現し、最初に初期世代の設定（初期世代人口数 50）を行う。次に実装したものを測定することより個体を評価し、終了条件を満たせば終了する。満たさなければ、次世代の個体を生成し、評価を行う。以下、終了条件の確認、次世代の生成、個体の評価を繰り返すことで最良のものを選定した。最適化で得たアンテナとダイポールアンテナの出力電圧を比較したところ、同じ条件においてダイポールアンテナの 1.4 倍に改善した。

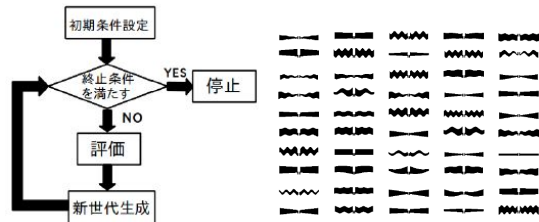


図 2 設計のフロー(左)と生成されたアンテナ形状(右)

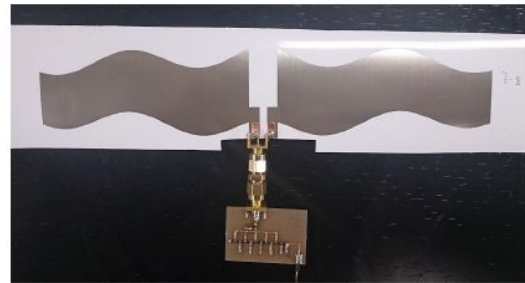


図 3 最も出力が高いアンテナと整流回路

(4) 共振型無線電力伝送応用

磁界共振結合型無線電力伝送は、他の手法と比較して中距離における高効率な給電が可能であることから、室内給電への応用が期待されている。室内給電の実現に向けては様々な技術課題が存在し、その一つ一つについて各種の解決策を本課題の中で取り組んできた。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や、D 級インバータを応用した可変リアクタンス回路による、人体などの誘電体や、金属、磁性体の影響を軽減する方式などが挙げられる。ここでは、給電が可能な領域を拡大するために送電共振器をアレイ化する際に生じる、受電共振器形状の工夫による最低給電効率の向上手法について報告する。

送電共振器アレイを用いた給電システムにおいて単独の受電共振器を用いると、送電共振器アレイの境界上などに送電共振器間の結合が弱まり、給電効率が著しく低下する位置が存在すると考えられる。スマートフォンなどの携帯型電子機器への給電を想定

した場合、このような位置の存在は機器が持つ利便性を大きく損ねてしまう。そこで本稿では、送電共振器アレイを用いた給電システムにおける、最も効率が悪化する位置での給電効率の向上、すなわち最低給電効率の向上という目的に対して、遺伝的アルゴリズムを用いた受電共振器アレイ形状の最適化を行った。

図4 評価したシステム

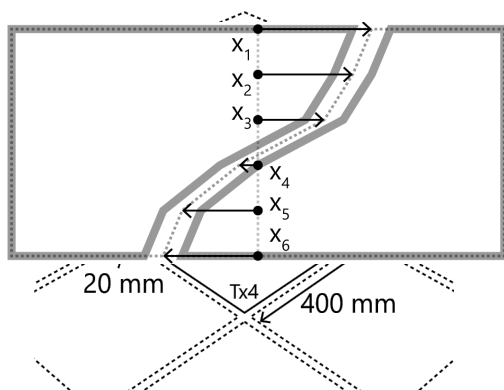


図5 遺伝的アルゴリズムによるエンコード

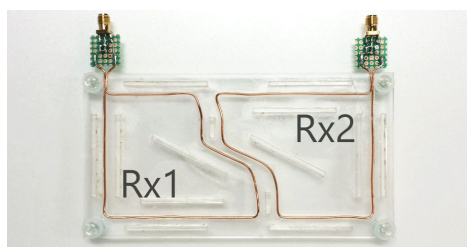


図6 最適な共振器形状

本稿では、図4に示した送電共振器アレイから受電共振器アレイに給電を行うシステムにおいて、受電共振器アレイ形状の最適化を行った。送電共振器アレイは一辺が400 mmの正方形型ループ共振器を20 mm 間隔で並べたもの、受電共振器アレイはスマートフォンの大きさを想定した130 mm x 60 mmの長方形内にループ共振器を二個並べたものとした。机上におけるスマートフォンへの給電等を想定し、送受電共振器アレイは常に平行に置かれているとした。図5に示した長さを表す6個の変数 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ を用いて、受電共振器アレイの形状を遺伝子としてエンコードし、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行った。遺伝的アルゴリズムの一世代あたりの個体数は30とし、世代数が60世代に達するか、10世代以上最適な個体に変化しない場合に最適化を終了した。各世代は、効率 \min が最も高かった2個体、交叉により生まれた22個体、突然変異により生まれた6個体から構成されるものとした。以上の手法により最適化を行った結果、図6に示した受電共振器アレイ形状が得られ、単独の受電共振器を用いた場合3.8%であった \min が、34.4%まで向上することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

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, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 56, pp. 250-259, 2015

S. Kim, Y. Kawahara, A. Georgiadis, A. Collado, M. M. Tentzeris, "Low-Cost Inkjet-Printed Fully Passive RFID Tags for Calibration-Free Capacitive/Haptic Sensor Applications," IEEE Sensors Journal, 査読有, Vol. 15, No. 6, pp. 3135-3145, 2015

DOI:10.1109/JSEN.2014.2366915

Y. Kawahara, S. Hodges, N.W. Gong, S. Olberding, J. Steimle, Building Functional Prototypes Using Conductive Inkjet Printing, IEEE Pervasive Computing, 査読有, Vol. 13, pp. 30-38, 2014

DOI:10.1109/MPRV.2014.41

〔学会発表〕(計25件)

(1) 川原圭博, デジタルファブリケーション技術の使い所, 日本化学会, 第96春季年会, 2016/3/24, 同志社大学(京都), (招待講演).

(2) 川原圭博, IoTを支えるデジタルものづくりのエコシステム, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 13.半導体分科企画シンポジウム, 2016/3/19, 東工大(東京), (招待講演).

(3) 橋爪崇弘, 笹谷拓也, 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, 銀ナノインクを用いたパンプ型圧力センサの人体貼付用途における設計手法, 信学総大 2016, B-18-17, 2016/3/15, 九州大学(福岡).

(4) Tung Ta Duc, Masaru Mizoguchi, Yoshihiro Kawahara, Tohru Asami, Error Reduction in Capacitive Based Water Level Sensor for Paddy Field, 信学総大 2016, B-18-16, 2016/3/15, 九州大学(福岡).

(5) 笹谷拓也, 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, 送電共振器アレイを用いた無線電力伝送における給電効率向上のための受電共振器アレイ形状の検討, 信学ソ大 2015, B-21-6, 2015/9/10, 東北大学(宮城).

(6) 橋爪崇弘, 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, 銀ナノインクを用いたパンプ型静電容量式圧力センサの試作と評価, 信学ソ大 2015, B-18-27, 2015/9/10, 東北大学(宮城).

(7) T. D. Ta, K. Narumi, Y. Kawahara, Assistant Tools and Techniques for Conductive Inkjet Printing Technology, Proc. of ACM UbiComp 2015, GadgetShow Plus Demo, 2015/9/10, グランフロント大

- 阪（大阪）。
- (8) T. D. Ta, M. Fukumoto, K. Narumi, S. Shino, Y. Kawahara, T. Asami, Interconnection and Double Layer for Flexible Electronic Circuit with Instant Inkjet Circuits, Proc. of ACM UbiComp 2015, pp. 181-190, 2015/9/9, グランフロント大阪（大阪）。
- (9) X. Shi, Y. Narusue, Y. Kawahara, and T. Asami, A Rapid Antenna Prototyping Method by Evolutionary Computation and Inkjet Printing, IMWS-AMP 2015, FA-2-3, 2015/7/3, Suzhou (China).
- (10) K. Narumi, X. Shi, S. Hodges, Y. Kawahara, S. Shimizu, and T. Asami, Circuit Eraser: A Tool for Iterative Design with Conductive Ink, CHI '15 Extended Abstracts, pp. 2307-2312, 2015/4/20, Seoul (Korea).
- (11) 川原圭博, 印刷によるエレクトロニクス—ホビーからIoTまで, 日本化学会第95 春期年会 2015, 2015/03/26, 日本大学（千葉）,（招待講演）。
- (12) 石欣洋, 成末義哲, 川原圭博, 浅見徹, 進化的計算手法を用いたインクジェット印刷アンテナ構造最適化, 信学総大 2015, B-18-72, 2015/03/10, 立命館大学（滋賀）。
- (13) 鳴海紘也, 川原圭博, 浅見徹, 手書き回路の解析が可能なCADソフトの実装に向けた導電性インクのシート抵抗の画像認識手法, 信学総大 2015, B-15-16, 2015/03/10, 立命館大学（滋賀）。
- (14) Y. Kawahara, Internet of “printed” Things- low-cost fabrication of autonomous sensing nodes by inkjet printing, International Conference on Computer and Communication Technology, 2014/12/11, Hyderabad (India)（招待講演）。
- (15) H. Ju, S. Kawasaki, Y. Kawahara, and T. Asami, “A Compact Mixer Type Retrodirective Hybrid Integrated Circuit”, KJMW2014, 2014/12/04, Suwon (Korea).
- (16) Y. Kawahara, Internet of “printed” Things- low-cost fabrication of autonomous sensing nodes by inkjet printing, PowerMEMS, 2014/11/18, 淡路夢舞台国際会議場（兵庫）,（招待講演）。
- (17) W. Wei, Y. Narusue, Y. Kawahara, and T. Asami, “Power Uniformity Analysis on Omnidirectional Wireless Power Transmission to a Cavity Using Helmholtz Resonators”, 信学ソ大 2014, B-21-10, 2014/09/23, 徳島大学（徳島）。
- (18) 鳴海紘也, 杉本雅明, 清水信哉, 川原圭博, 浅見徹, “銀ナノインクでの回路プロトタイピングにおける書き直し特性の計測”, 信学ソ大 2014, B-18-3, 2014/09/23, 徳島大学（徳島）。
- (19) 仲又暁洋, 成末義哲, 魏巍, 川原圭博, 浅見徹, “生体情報のウェアラブル計測に向けた無線電力伝送用受電器のインクジェット印刷技術による簡易設計と評価”, 信学ソ大 2014, B-18-2, 2014/09/23, 徳島大学（徳島）。
- (20) 石欣洋, 魏巍, 川原圭博, 浅見徹, “家庭用インクジェットプリンタによるアンテナのラピッドプロトタイピングについての一検討”, 信学ソ大 2014, B-18-1, 2014/09/23, 徳島大学（徳島）。
- (21) Tung Ta Duc, Wei Wei, Quan Duong Minh, Yoshihiro Kawahara, Tohru Asami, “Tweaking Printer Driver for Improved Conductivity in Instant Inkjet Circuits”, 情報処理学会-コピキタスコンピューティングシステム研究会, 2014/05/29, 富山国際会議場（富山）。
- (22) M. Q. Duong, Y. Kawahara, T. Asami, Design of Touch-Sensitive Surface with Arbitrary Shape Based on Time-Domain Reflectometry Using Inkjet Printing, IEEE Radio & Wireless Week, 2014/1/26, Newport Beach (USA).
- (23) Tung Ta Duc, Nic Wae, Quan Duong Minh, Yoshihiro Kawahara, Tohru Asami, “Modified Printer Driver to Improve Conductivity of Ink-jet Printed Silver Ink Pattern by Over-Printing”, 信学ソ大 2013, 2013/09/19, 福岡工業大学（福岡）。
- (24) Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd, Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp2013), 2013/9/14, Zurich (Switzerland).
- (25) Y. Kawahara, W. Wei, and T. Asami, Rapid Prototyping of Antennas and Sensors Using a Home Inkjet Printer, Printed Electronics Asia 2013, 2013/7/9-10, Hilton Tokyo (Tokyo).

〔その他〕

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅見 徹（ASAMI, Tohru）

東京大学・大学院情報理工学系研究科

・教授

研究者番号：00436560

(2)研究分担者

川原 圭博 (KAWAHARA, Yoshihiro)

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