

令和元年6月4日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2018

課題番号：26700017

研究課題名（和文）近接電力伝送の時空間操作による移動体の制御

研究課題名（英文）An Operation Method for Robots by Proximity Power Transmission

研究代表者

杉浦 裕太（SUGIURA, YUTA）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・講師

研究者番号：40725967

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,500,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、平面を移動する物体への床面からの近接での非接触電力伝送による電力供給及び電力の時空間操作による移動体の位置制御基盤構築を目指し、期間中では5つの成果を創出できた。具体的には、1. カード型インタフェースを用いた移動体の制御手法、2. 近接でのセンシング手法、3. 機械学習を用いた二次元通信システム上でのデバイス位置・回転計測手法、4. 移動体の軌道シミュレーション、5. 集束超音波装置を用いた実世界物体に対する駆動手法、を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題は外部より移動体に対するエネルギー伝送技術の確立を目指したものである。この技術により、移動体を軽薄短小化できるため、移動体自体は安価で簡便に構成でき、組み替えも柔軟に行え、安全で長期的に運用できるシステムを構築できる。狭い住宅環境において物体を搬送する移動体制御への応用や、子供の知育向けシステムとしての応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focus to construct a system that can transmit power to a robot and sense position of the robot using energy projection techniques. Five research results were created in this research. First, we developed card-type user interface that can control the behavior of the robot. Second, several proximity sensing techniques were proposed. Third, we developed a system of detecting the position of a device embedded with an antenna by sensing the electrical power from a two-dimensional communication (2DC) sheet by using machine learning. Forth, we prototyped a system that can simulate a path of the robot. Fifth, we created an energy projection method using a focused ultrasound to remotely control real world objects.

研究分野：ヒューマンインタフェース・インタラクション

キーワード：ヒューマンコンピュータインタラクション ユーザインタフェース 二次元通信 バーチャルリアリティ
コンピュータインテリング 近接エネルギー伝送 小型移動ロボット

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

平面上を移動する自立型移動体は、アクチュエータを駆動するための「電源」や「自己位置を推定するためのセンサ」を設置している必要があり、ロボットの大きさと運用時間および機動性は二律背反な関係である。一方で、ロボットの小型化を保ちつつ、長時間運用ができ、さらに安定的に位置を制御できれば、我々の生活空間に浸透しつつ、常時支援できる存在となるだろう。まず、電力問題を解決する方法としては、移動体の外部から移動体に電源を供給する手法が考えられる。例えば、有線を利用した1次元的なエネルギー伝搬手法では、配線の必要性から、特に自由に移動する移動体や、障害物等を有した環境に適用させるためには複雑な制御手法が必要となり、近年そのためのアルゴリズムも提案されている[1]。しかし日常環境に適用されるためにはケーブルの収納など課題が多い。また、エネルギーを3次元的に供給する場合については、今度は、安全面などの課題が生じる。例えば、小泉らはレーザー光を利用した熱照射によるエネルギー供給を提案し[2]、河島らは飛行体に対して供給しているが[3]、ユーザと移動体が乖離している場での運用に留まる。ロボットの電源が解決できたとしても、次は制御系を小型化する必要がある。制御をロボット内で完結させるためには、環境における自己位置の推定機能を保有する必要がある。そのために、レーザレンジファインダなどの高性能センサや、近年では、Kinectなどの安価な深度センサを用いて、環境を構築しながら、位置を推定する。他のアプローチとしては、モーションキャプチャや一般的なwebカメラを環境側に取り付け、ロボットの位置を逐一環境が認識制御信号として与える方法である[4]。一方で、これらのシステムは、遮蔽の問題や移動体の台数と計測速度で二律背反の関係もある。

そこで本提案では、平面からのエネルギー伝搬を利用して移動体への電源供給および位置制御を行う手法を提案する。具体的には、篠田らが開発したマイクロ波が伝搬する平面シートを利用し[5]、移動体に近接場で電力を給電する。さらに、定在波による電界強度の差やロボットとシートとの間に導体を挟むことによるエネルギー給電量の時空間的な差を利用して移動体への二次平面上での位置制御を実現する。例えば、二つのアンテナがあった場合に、それぞれ違う量のエネルギーを供給させることで、差を発生させ、モータの回転数や回転方向を制御し、移動体を移動させる。従来にも、面でのエネルギー供給における移動体の動作制御が提案されているが、これは電磁誘導を利用して、移動体制御を実現しており、送信と受信側の位置が少しでもズレてしまった場合、エネルギーを供給させることは困難である。本手法は、平面内どこでも非接触でエネルギー供給が可能であるため、「平面を自由に移動する移動体」に対して適している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、平面を移動する物体（以下、移動体）への床面からの近接での非接触電力伝送による電力供給及び電力の時空間操作による移動体の位置制御の確立である。この移動体は複数のアンテナを持ち、二次元通信シートから漏れるエバネッセント波により電力を受信し、移動する。二次元通信シート面に発生する定在波によるエネルギー場を時空間操作することで、移動体への電力供給量を制御し、シート内の特定の位置まで移動させる。本手法では、移動体は電源及び自己位置を把握するセンサを搭載する必要がない。従って移動体を軽薄短小化できるため、移動体自体は安価に構成でき、組み替えも柔軟に行え、安全で長期的に運用できる。

3. 研究の方法

本研究では、以下の研究項目に取り組むことで、二次元通信システムにおける移動体の制御方法を確立する。

(1) 移動体の構築：アンテナから電力が供給され、またその電力の時空間差によって移動方向を変化させる移動体を作成する。本移動体には、マイクロ波を受信するアンテナ、および整流にする回路およびその差からモータの回転数を制御する回路で構成されている。

(2) 動作指示カードの作成：給電面とロボットの間で導体を挟むことで、電力伝送を遮り、ロボットの動作を即時的に変更することができるカードを作成する。実際にロボットがそのカードに従って動作をするかの検証を行う。

(3) 定在波の分布データベース構築：実測値から定在波の分布のデータベースを作成する。実測には、篠田らが利用した電磁波系を利用する。もしくは、独自の計測用のスキャナを開発して、データベース作成の効率化を目指す。

(4) 機械学習による移動体の位置識別：構築したデータベースから、機械学習によるデバイスの位置推定をする手法の確立を目指す。

(5) 移動体の軌跡のシミュレーション：定在波の空間分布のデータベースから、移動体を特定の位置まで移動させるためのシミュレータを開発する。このシミュレータは、移動体の初期位

置，目的位置，移動速度を入力パラメータとする．また，複数台の移動体を同時に制御するためのシミュレータを開発する．

4. 研究成果

本課題期間において，以下の研究成果を創出できた．

(1) カード型インターフェースによる移動体の制御手法の開発：本研究では，平面からのエネルギー伝搬を利用して移動体へ電源供給および移動を制御する手法を提案した．具体的には，マイクロ波が伝搬する平面シートを利用し，移動体に近接場で電力を給電する．さらに，ロボットとシートとの間に導体を挟むことによるエネルギー給電量の時空間的な差を利用して移動体への二次平面上での位置制御を実現する．例えば，二つのアンテナがあった場合に，それぞれ違う量のエネルギーを供給させることで，モータの回転数や回転方向を制御し，移動体を移動させる．本手法は，平面内のどこに対しても非接触でエネルギー供給が可能であるため，「平面を自由に移動する移動体」に対して適している．

二次元通信シート表面の1層下にはメッシュ導電層がある．これはエバネッセント波の発生に必要な不可欠な構造である．例えばこのメッシュ部分を，導電板にするとエバネッセント波は発生しない．そのため，シート表面に金属板を配置し金属板上に受電コイルが乗るとエネルギー供給が遮断される現象が起きる．これを意図的に作り出すことによりエネルギー供給量の制御を実現する(図1)．システムは，二次元通信シート，発信機，移動ロボット，動作制御回路から構成される．本研究で開発した移動ロボットは，受電アンテナが二つ独立で配置されている．それぞれのアンテナで受電した交流は，整流回路によって，直流化されDCモータを駆動する．動作制御カードは，市販のアルミニウムシートを貼り付けることで実現する．カードにはロボットの軌跡が描かれたグラフィックがあり，ユーザはそれを見ることによって，ロボットがどちらの方向に移動するかを直感的に理解できるようになっている．本システムでは，様々なカードのパターンを作成し，ロボットの移動軌跡を制御することに成功した．



図1 二次元通信システムとカードで移動体を制御(左)，アンテナを複数備えた移動体(右)

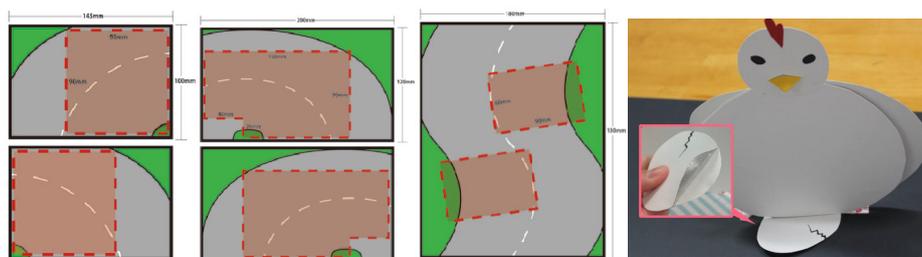


図2 移動体を制御するカード型インターフェース(左)，応用したアプリケーション(右)

(2) 近接センシング技術の開発：本研究課題は近接での移動体へのエネルギー伝送に着目したものであるが，同時に近接での計測技術についての検討も実施した．具体的には反射型光センサを用いて，柔軟物の素材の変形を捉えることによって，居住空間に存在する日用品や人間の身体を計測システム化する研究にも取り組んだ．

(3) 二次元通信システム上でのデバイスの位置計測技術の確立：二次元通信シートの電界強度マップを作成し，配置されたアンテナの位置推定を行うシステムを開発した．二次元通信シートの電界強度マップの作成にあたっては，二次元平面を移動するX-Yプロッタを用いた(図3)．このプロッタの駆動部の先端にアンテナを装着して，平面に設置させながら移動させることで，二次元平面上の電界強度マップを作成した．さらに，二次元通信シートに伝搬させている電磁波の周波数を発信器で操作できるようにし，各場所での受電データを周波数と対応付けて蓄積した．結果を観察すると，周波数を変化させたとき二次元平面のそれぞれの任意の点において特徴的なデータになることがわかった(図4)．そこで，教師有り機械学習であるSupport Vector Machine (SVM)を用いて識別器を作成して，アンテナを配置された位置の識別を実現した．実験では，300mm × 300mmの大きさに区切った二次元平面を20分割して，それぞれの位置にお

る識別率を計測した。その識別率は、最も低い点でも 86.5%であり、比較的高い識別率となった。また 63 分割にした際の識別精度も算出したが、20 分割と比べるとその精度は下がった。事前検討において、二次元通信システムを用いてデバイスの位置識別ができることが分かったため、構築した周波数掃引による二次元通信シート上の位置計測システムの計測解像度や精度の向上に向けた取り組みを実施した。実験では、300mm × 300mm の大きさに加工した二次元通信シート上で、受電アンテナを X-Y プロッタの先端に装着して動かし、電界強度マップを作成した。電磁波の周波数は 2.20GHz から 2.50GHz の間で 0.01GHz ごとに変化させる。この掃引を 22 回行い、また受電アンテナを 12mm ずつ移動させてデータを収集した。教師有り機械学習である Support Vector Machine (SVM) を用いて識別器を作成した。その結果、79.1% で受電アンテナが配置された平面上の位置を識別できることを確認した (図 4)。識別を失敗した 60.7% はその隣接ポイント内の 8 点のうちどこかで識別をしていることがわかった。

さらに、構築した周波数掃引による、二次元通信シート上の位置計測システムにおける受電アンテナデバイスの回転の影響が発生することがわかったため、これに重点を当てて実験を実施した。まずアンテナデバイスを回転させた状態でデータを計測するための治具を設計した (図 3)。シート上の 84mm × 84mm の正方形領域において、12mm ずつ縦と横に受電アンテナデバイスを移動させて、さらにこれをそれぞれの位置で 15 度ずつ回転させたときのデータを収集した。このデータに対し 2 つの方法でデータセットを作成して交差検証を行い、識別率を比較した。1 つ目の方法はアンテナの方向の違いを区別せず、同じ位置のデータをまとめて同一クラスとして分類する方法である。識別には、昨年度と同様に教師有り機械学習である Support Vector Machine (SVM) を用いて実施した。合計で 64 クラスとなり、この識別率は 38.3% となった。そのときの平均誤差距離は 18.8mm であった。2 つ目の方法はアンテナの方向の差異を区別して、すべての状態を異なるクラスとして分類する方法である。この方法では、1536 クラス分類であり、識別率が 55.9% と、1 つ目の方法よりも高い精度となった。この条件での平均誤差距離は 8.0mm で、距離の誤差なく推定される確率は 70% であった。方向の平均誤差角度は 4.4 度で、80% が正しい方向で推定された。この技術によって、二次元通信シート上に配置された移動ロボットの位置と回転方向の推定を実現するシステムを構築できた。

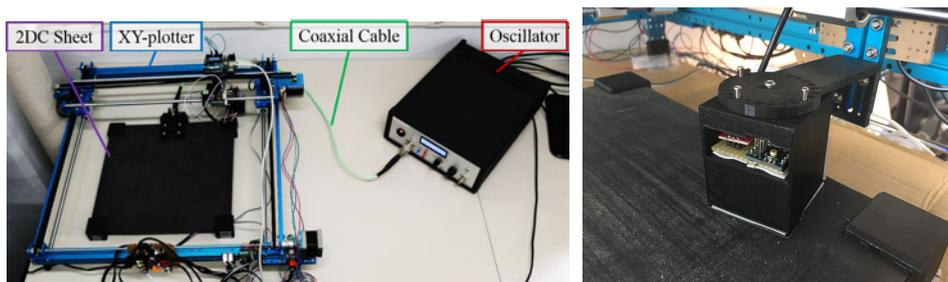


図 3 電界マップ構築システムの概要 (左)、アンテナと回転可能な機構 (右)

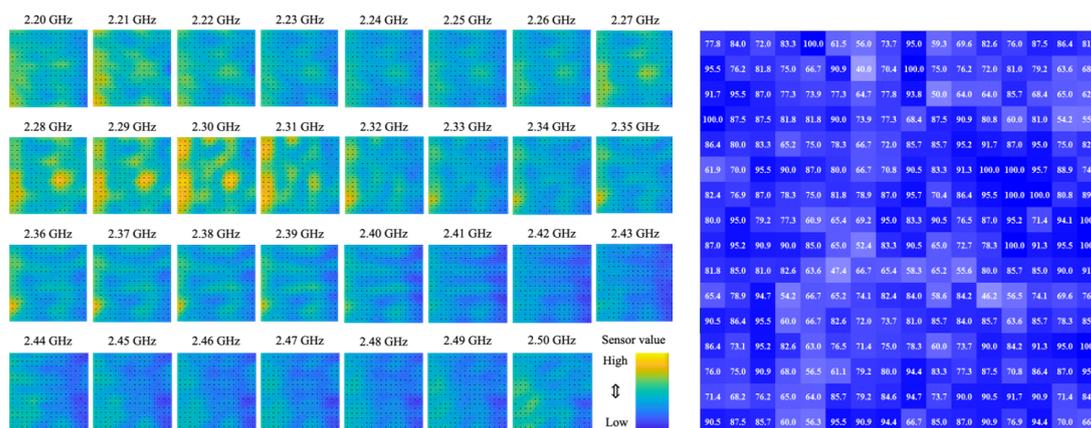


図 4 各周波数におけるシート上の電界強度分布 (左)、隣接点間距離 12mm のときの各位置における識別率 (右)

(4) 移動体の軌跡シミュレーションソフトウェアの開発：(2)の成果のデータセットを用いて、移動体シミュレータを作成した (図 5)。このシミュレータは、ロボットが位置計測と移動を繰り返しながら、入力された目的位置への到達を目指すシステムである。ロボットの動作には実世界での不確定な振る舞いを含んでいる。このシミュレータによって、複数移動経路を設定し、移動体が目的位置に到達することを確認した。

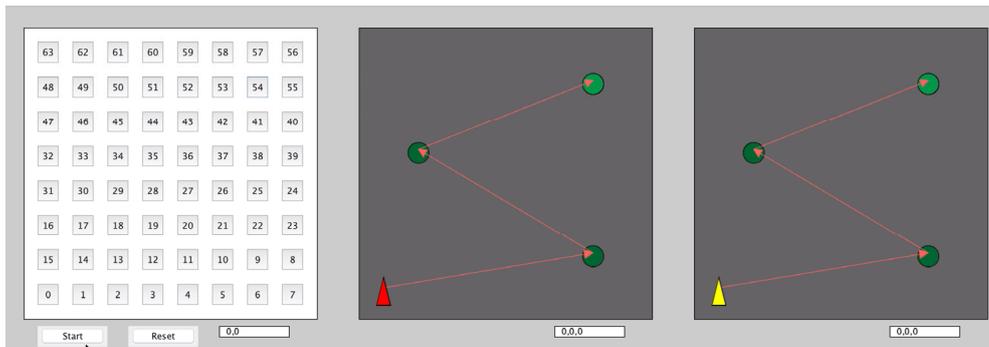


図5 移動体移動シミュレーションソフトウェアの画面

(5) 集束超音波装置による近接エネルギー伝送技術の開発：本課題では、近接エネルギー伝送の別の形態として、集束超音波装置を用いて、物体の駆動を実現した。具体的には、集束超音波装置を用いて、被毛布の毛の方向を制御する。毛の方向が変化すると、異方性によって濃淡が変化するため、これを用いて視覚的な表示手法を実現した。

<引用文献>

- ① Igarashi, T. and Stilman, M. Homotopic Path Planning on Manifolds for Cabled Mobile Robots. In Proc. WAFR 2010, 13-15 Dec. 2010, Singapore, pp. 1-18.
- ② [2]Koizumi, N. et al., Animated paper: A toolkit for building moving toys. Computers in Entertainment (CIE) Vol.8, No.2, Article 7, pp.1-16. 2010.
- ③ Kawashima, N. and Takeda, K. Laser Energy Transmission for a Wireless Energy Supply to Robots, Robotics and Automation in Construction, Carlos Balaguer and Mohamed Abderrahim (Ed.), ISBN: 978-953-7619-13-8, InTech.
- ④ 加藤他, Andy: 俯瞰カメラとマーカを用いた移動ロボットアプリケーション開発用ツールキット, 情報処理学会論文誌 52(4), pp.1425-1437, 2011年4月.
- ⑤ Shinoda, H. et al., Flexible Tactile Sensor Skin Using Wireless Sensor Elements Coupled with 2D Microwaves, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.22 No.6, pp.784-789, 2010.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

- ①Junya Taira, Suzanne Low, Maki Sugimoto, and Yuta Sugiura, Detecting Position of a Device by Swept Frequency of Microwave on Two-Dimensional Communication System, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.12, No.3, 116-123, 2019年, DOI: <https://doi.org/10.9746/jcmsi.12.116>
- ②杉浦裕太, 戸田光紀, 菊地高史, 星貴之, 神山洋一, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, Grassffiti: 芝生をパブリックディスプレイにする手法, 映像情報メディア学会誌, 査読有, 71, 2017年, J280~J282, <https://doi.org/10.3169/itej.71.J280>
- ③菊地高史, 正井克俊, 杉本麻樹, Bruce H. Thomas, 杉浦裕太, EarTouch: 耳の入力インタフェース化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, 22, 2017年, 477~483, https://doi.org/10.18974/tvrsj.22.4_477
- ④Yuta Sugiura, Takeo Igarashi, and Masahiko Inami, Cuddly User Interface, IEEE Computer, 査読有, 49, 2016年, 14-19, 国際共著, DOI: 10.1109/MC.2016.196
- ⑤杉浦裕太, リーカリスト, 尾形正泰, ウィタナアヌーシャ, 坂本大介, 牧野泰才, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, PINOKY: めいぐるみに動きを付与するデバイス, 情報処理学会論文誌, 査読有, 57, 2016年, 2542-2553, https://doi.org/10.18974/tvrsj.20.2_115
- ⑥杉浦裕太, 稲見昌彦, 五十嵐健夫, 光透過性を利用した薄い布の伸縮の計測とその応用, バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol.20, No.2, 2015年, 115-121, https://doi.org/10.18974/tvrsj.20.2_115

⑦杉浦裕太, 戸田光紀, 星貴之, 神山洋一, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, Graffiti Fur: 被毛を有する布をディスプレイ化する手法, バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol. 20, No. 2, 2015年, 151-161,
https://doi.org/10.18974/tvrsj.20.2_151

⑧杉浦裕太, 笥豪太, ウィタナアヌーシャ, 坂本大介, 杉本麻樹, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, FuwaFuwa: 複数のフォトリフレクタモジュールを用いた柔軟物への接触検知手法, バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, Vol. 20, No. 3, 2015年, 209-217,
https://doi.org/10.18974/tvrsj.20.3_209

[学会発表] (計10件)

①Junya Taira, Suzanne Low, Maki Sugimoto, and Yuta Sugiura, Detecting Position of a Device by Swept Frequency of Microwave on Two-Dimensional Communication System, 2018 57th Annual Conference of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE) (国際学会), 2018年

②Takashi Kikuchi, Yuta Sugiura, Katsutoshi Masai, Maki Sugimoto, and Bruce H. Thomas, EarTouch: turning the ear into an input surface, MobileHCI '17 (国際学会), 2017年

③Koki Yamashita, Takashi Kikuchi, Katsutoshi Masai, Maki Sugimoto, Bruce H. Thomas, and Yuta Sugiura, CheekInput: turning your cheek into an input surface by embedded optical sensors on a head-mounted display, VRST '17 (国際学会), 2017年

④平純也, 杉浦裕太, 杉本麻樹, 二次元通信システムにおける周波数シフトによるデバイスの位置推定, ROBOMECH2017, 2017年

⑤Yuta Sugiura, Koki Toda, Takashi Kikuchi, Takayuki Hoshi, Youichi Kamiyama, Takeo Igarashi, and Masahiko Inami, Grassffiti: Drawing Method to Produce Large-scale Pictures on Conventional Grass Fields, Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '17) (国際学会), 2017年

⑥杉浦裕太, 坂本菜月, 神山洋一, 南澤孝太, 牧野泰才, 稲見昌彦, カード型インタフェースを用いた非接触給電駆動式ロボットの制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015年

⑦Yuta Sugiura, Koki Toda, Takayuki Hoshi, Youichi Kamiyama, Takeo Igarashi, and Masahiko Inami, Graffiti fur: turning your carpet into a computer display, 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '14), 2014年

⑧Yuta Sugiura, Koki Toda, Takayuki Hoshi, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi, Graffiti fur: turning your carpet into a computer display, ACM SIGGRAPH 2014 Studio, 2014年

⑨Yuta Sugiura, Koki Toda, Takayuki Hoshi, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi, Graffiti fur: turning your carpet into a computer display, ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, 2014年

⑩杉浦裕太, 星貴之, 神山洋一, 五十嵐健夫, 稲見昌彦, 超音波集束装置を用いた被毛布への描画手法, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2014年

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。