

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03972

研究課題名（和文）1メートルストローク、1ナノメートル微動を実現するワイヤレス多自由度小型自走機械

研究課題名（英文）Multi-DOF wireless mobile microrobot with 1 m stroke and 1 nm motion

研究代表者

鳥井 昭宏 (Torii, Akihiro)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：70267889

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまでに開発された圧電素子の伸縮と電磁石の吸着を利用したインチワーム型多自由度小型自走機械を基に、自律移動を可能にする技術的拡張を行った。具体的には、外部に設置されたグローバルカメラと小型自走機械に搭載されたローカルカメラの連携、鉛直方向の振動を利用して浮上を推定するための電気信号の取得と浮上量の相関の測定、小型自走機械が検出した情報を外部に伝達する方法、配線を用いない電力供給およびその実現のために移動機構に搭載する電力変換回路、に関する各項目を明らかにした。これらの技術により自走機械の移動が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究によって得られた成果は、小型自走機械の実現に資する。小型自走機械は省エネルギー・省資源・省スペースなどに貢献する。小型自走機械の構成要素は、小型ロボット・精密作業ロボット・多機能ロボットなどに応用でき、学術的・社会的に意義が高い。この研究の成果は、電気機械変換技術・電力変換技術・情報伝達技術の融合であり、限られた体積に高度に集積化された機能を有するデバイスの開発に役立つ。小型自走機械の自律動作は、AIや機械学習と融合することによって、ロボットなどの自動機械の知能化に役立ち、作業のDX化や省人化を実現する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted technological expansions to enable autonomous movement based on a previously developed inchworm-type multi-degree-of-freedom small self-propelled machine that utilizes the expansion and contraction of piezoelectric elements and the attraction of electromagnets. We clarified the following components: the collaboration between a global camera installed externally and a local camera mounted on the small self-propelled machine, the acquisition of electrical signals to estimate levitation using vertical vibrations and the measurement of the correlation of the levitation amount, methods for transmitting information detected by the small self-propelled machine to the external environment, and the configuration of wireless power supply and the power conversion circuit mounted on the movement mechanism to achieve this. These advancements enabled the movement of the self-propelled machine.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：インチワーム 圧電素子 電磁石 計測 制御 推定 自律移動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の加工装置は、小型の製品を加工するために大型の加工装置を使用することが多い。小型製品の生産に小型の加工装置や小型のアクチュエータを使用することは合理的な理由があり、そのことは省スペース、省資源、省エネルギーに資する。この研究によって得られる成果は、小型加工装置用のアクチュエータを実現するだけでなく、小型の光学素子の自動アライメントや微小粒子のマニピュレーション技術などに、広く活用できる。

これまでに位置を保持する機構と変位を発生する機構を組み合わせたインチワーム方式の小形自走機械を開発した。その研究を進める途中で、広域平面内位置計測システムの開発ならびにワイヤレス駆動が不可欠であることがわかった。それらを実現するためには、移動範囲全体を見渡すグローバル位置計測システムと自走機械に搭載したローカル位置計測システムの連携とが必要でありことが明らかになった。そのうえで、小型自走機械を精密に移動させるためのワイヤレス化が必要であり、そのためのワイヤレス給電と情報通信技術が必要であることも明らかにされた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、小型の多自由度アクチュエータを大型機械の一部に組み込んで使用するのではなく、大型機械から解放して単独の移動機械として運転することである。具体的には、平面内を自走する小型自走機械を、自律的に制御することである。そのために必要な小型自走機械の構成を明らかにすることが目的である。

本研究で対象とする小型移動機械は、大面積のフィールドを自律的に自由に移動し、精密作業をおこなうことができる。本研究の目的は、小型自走機械の自律走行を行う際に問題となる位置計測と制御方法、エネルギー供給方法について、総合的に研究することである。これによって、自律移動する小型自走式機械の実現が可能になり、将来は精密作業をする小型自走式機械群を同時に並列に運転することも可能になる。さらに、小型であるがゆえに必要な電力効率を最大化する多自由度アクチュエータのエネルギーマネジメントを導入した新しい制御技術を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)これまでに開発した小形自走機械は、並進2自由度と回転1自由度を行うインチワーム型移動機構である。大きさは約10cmである。3個の積層型圧電素子は正三角形に接続され、三角形の辺の長手方向に伸縮する。正三角形の頂点に電磁石が取り付けられ、電磁力によって移動面上で位置を保持する。電磁力がオフの1個の電磁石を、接続する(連結された)2個の圧電素子の伸縮により移動させる。この動作を他の電磁石に対して順番に繰り返すことによって、自走機械の2次元平面上での直進移動と回転移動の自由な移動を実現する。圧電素子の伸縮と電磁石の励磁は、給電用配線によって与えられ、圧電素子の伸縮と電磁石のオンオフが順番に実行される。

(2)小型自走機械の計測と制御

小型自走機械の外側に設置したグローバルカメラ(5メガピクセル、1メートル四方、分解能0.2ミリメートル)と小型自走機械に搭載したローカルカメラ(1メガピクセル、1ミリメートル四方、分解能1マイクロメートル)を連携した自走機械のXY3自由度位置計測を行う。グローバルカメラによる位置計測をレーザ変位計によって評価する。ローカルカメラによる位置計測も同様にレーザ変位計によって評価する。

小型自走機械への外乱に摩擦がある。摩擦の影響を避けるために、浮上を用いて非接触状態を生成する。浮上の発生には積層型圧電素子の鉛直方向振動を利用する。小型自走機械は平面内を移動するため、移動する小型自走機械の浮上量を変位センサによって測定することは困難である。そこで、浮上を発生させる積層圧電素子の電気信号(電圧、電流、それらの位相差、電力、以上の瞬時値と実効値)と、レーザ変位計によって得られる浮上量を比較し、それらの関係を明らかにすることによって、浮上量推定を行う。

(3)小型自走機械のエネルギー伝送

電気エネルギーは、ワイヤレス給電による方法、床面の給電パッドを介した方法、電池を搭載した方法によって供給する。ワイヤレス給電は、磁界結合方式の給電方法を用いる。外界に設置された送電用コイルと、小型自走機械に搭載された受電用コイルとを用いる。両者はキャパシタと接続されて、共振周波数が等しくなるように設計する。ISMバンドの周波数を用いる。送電用コイルと受電用コイルの相対位置が変化することによって、伝送効率が変化するため、送電側の

電力を調整することによって、伝送電力が一定になるように調整する。床面の給電パッドを介した方法と電池を搭載した方法は、給電パッド間の電位差と電池が供給する電圧を、圧電素子駆動用の電圧と電磁石駆動用の電流に変換する必要がある。そのため、昇降圧変換回路を小型自走機械に搭載し、圧電素子と電磁石の駆動にふさわしい電圧に変換する。

(4)小型自走機械の情報通信

小型自走機械は、自身の状態や検出した情報を外界に情報伝送する必要がある。前項で述べたエネルギー伝送をワイヤレスの方法によって行うため、小型自走機械から外界への情報伝達もワイヤレス手法が望ましい。そこで小型自走機械に小型の液晶表示装置(LCD)とLCD制御用の小型マイコンを搭載する。自身の状態や検出したセンサ情報をLCD上のQRコードとして表示する。表示された情報は、位置計測用のグローバルカメラによって読み取る。これによりワイヤレス手法によって小型自走機械から外界への情報伝達が可能になる。外界への伝達情報は、小型移動機械が検出する自身の位置情報と、小型移動機械が検出する情報(例えば、表面粗さ)を外界に伝達する。

4. 研究成果

(1)グローバルカメラを用いてカメラの画素数と観察範囲に基づく位置計測が実現できた。5メガピクセルのカメラで約10センチメートル四方の範囲を観察した。ローカルカメラを用いてカメラの画素数と観察範囲に基づく位置計測が実現できた。1メガピクセルのカメラで約1ミリメートル四方の範囲を観察した。得られた観察結果をレーザ変位計による測定結果と比較し、カメラ画像を用いた簡単な方法で数マイクロメートルの移動を測定できた。

(2)鉛直方向に振動する圧電素子の電圧電流信号の瞬時値と両者の位相差、瞬時電力を明らかにした。それらをもとに小型自走機械の浮上量との関係を明らかにした。電気信号は時間とともに変化する瞬時値であるのに対し、浮上量は駆動周波数とは異なる低周波信号である。そこで、電気信号の実効値と浮上量との関係を明らかにした。これによって、センサレス浮上量推定の可能性を示すことができた。

(3)給電パッドを用いて小型自走機械に電力を供給した。給電パッド間の電位差を電磁石と圧電素子の駆動に必要な電圧に昇降圧する変換回路を搭載し、電磁石と圧電素子を駆動し、小型自走機械を駆動した。

(4)電池を搭載した小型自走機械を製作し、小型自走機械を駆動した。電池の電圧(9ボルト)を、電磁石と圧電素子の駆動に必要な電圧に昇降圧する変換回路を搭載した。その変換回路を用いて電磁石と圧電素子を駆動し、小型自走機械を駆動した。圧電素子の駆動には約150ボルトの電圧を用いた。そのため、約17倍の昇圧比の回路を製作して対応した。これまで外部電源から配線を用いて駆動していた小型自走機械と同様の移動量が得られた。

(5)磁界共振型ワイヤレス給電の手法を用いて、小型自走機械に電力を供給した。小型自走機械に搭載した受電用コイルと、小型自走機械の周りに配置された送電用コイルの相対位置の変化によって、コイル間の相互インダクタンスが変化し、共振周波数が変化した。ハーフブリッジインバータを用いて共振状態を追従した。この回路を用いることにより、小型自走機械に一定の電圧、あるいは一定の電力を供給できた。

(6)小型自走機械に搭載したLCDに小型自走機械の自己情報を表示するシステムを構成した。小型マイコンと小型LCDを約10センチの大きさの小型自走機械に搭載した。このLCDに検出した位置情報(模擬データ)のQRコードを表示した。位置検出用のグローバルカメラによって小型自走機械に搭載したLCDが表示するQRコードを読み取り、デコードすることによって、小型自走機械の発信情報を外界に伝送することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 高島颯太, 松田裕亮, 鳥井昭宏, 元谷卓, 道木加絵	4. 巻 31
2. 論文標題 圧電素子のひずみ特性を利用したインチワームの制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大庭功嗣, 元谷卓, 道木加絵, 鳥井昭宏	4. 巻 31
2. 論文標題 小型移動ロボットへの非接触給電におけるPT対称性を利用した電圧評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 OTAKE Shuhei, MOTOTANI Suguru, DOKI Kae, TORII Akihiro	4. 巻 30
2. 論文標題 Design of LC for Wireless Power Transfer ATAC Method to Small Mobile Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 238 ~ 244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.30.238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KURODA Gun, MOTOTANI Suguru, DOKI Kae, TORII Akihiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Stabilization of Power Receiving Coil Voltage by Feedback on Wireless Power Transfer to Small Mobile Robot	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 7 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.29.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Ryo, Mototani Suguru, Doki Kae, Torii Akihiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Transmission Characteristics of Wireless Power Transmission Using a Cone Spiral Coil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 315 ~ 320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.29.315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 松田 裕亮, 鳥井 昭宏, 元谷 卓, 道木 加絵
2. 発表標題 画像処理を用いた小型移動ロボットの移動量測定
3. 学会等名 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryosuke Kawai, Akihiro Torii, Suguru Mototani, Kae Doki
2. 発表標題 Control signal of levitation actuator using vertically vibrating piezoelectric actuator
3. 学会等名 Int. Conf. and Exhibition, european society for precision engineering and nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Matsuda, Akihiro Torii, Suguru Mototani, Kae Doki
2. 発表標題 Structure and control of an inchworm for precise displacement
3. 学会等名 Int. Conf. and Exhibition, european society for precision engineering and nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大庭功嗣, 元谷 卓, 道木加絵, 鳥井昭宏
2. 発表標題 小型移動ロボットへの非接触給電におけるPT対称性を利用した受電電力変動の抑制
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大庭功嗣, 元谷卓, 鳥井昭宏, 道木加絵
2. 発表標題 85kHz 非接触給電における ATAC 方式を利用した受電電圧変動の 抑制
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合亮佑, 高島颯太, 鳥井昭宏, 元谷卓, 道木加絵
2. 発表標題 電流制限された圧電素子で駆動される浮上機構の信号
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島颯太, 松田裕亮, 鳥井昭宏, 元谷卓, 道木加絵
2. 発表標題 圧電素子のバタフライループを考慮したマイクロ移動ロボット
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河合亮佑、高島颯太、鳥井昭宏、元谷 卓、道木加絵
2. 発表標題 圧電素子を用いた浮上機構の電気信号
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島颯太，松田裕亮，鳥井昭宏，元谷 卓，道木加絵
2. 発表標題 バッテリー電力供給によるマイクロ移動ロボットの制御の検討
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田裕亮，高島颯太，鳥井昭宏，元谷 卓，道木加絵
2. 発表標題 カメラによるロボットの位置測定時の分解能
3. 学会等名 精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大庭 功嗣，元谷 卓，道木 加絵，鳥井 昭宏
2. 発表標題 小型移動ロボットへの非接触給電におけるPT対称性を利用した電圧評価
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島 颯太, 松田 裕亮, 鳥井 昭宏, 元谷 卓, 道木 加絵
2. 発表標題 圧電素子のひずみ特性を利用したインチワームの制御
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 裕亮, 高島 颯太, 鳥井 昭宏, 元谷 卓, 道木 加絵
2. 発表標題 電磁石の時定数によるロボットの駆動周波数への影響
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Matsuda, H. Takashima, A. Torii, S. Mototani, K. Doki
2. 発表標題 Robot position measurement system using image processing
3. 学会等名 Int. Conf. Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Kawai, H. Takashima, A. Torii, S. Mototani, K. Doki
2. 発表標題 Electric power and levitation height of levitation actuator
3. 学会等名 Int. Conf. Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Takashima, A. Torii, S. Mototani, K. Doki
2. 発表標題 Communication of a microrobot using QR code
3. 学会等名 Int. Conf. Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田裕亮, 高島颯太, 烏井昭宏, 元谷 卓, 道木加絵
2. 発表標題 小型移動ロボットの電磁石のコアの長さ移動速度
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河合亮佑, 高島颯太, 烏井昭宏, 元谷 卓, 道木加絵
2. 発表標題 浮上機構の浮上量推定のための印加電圧と共振周波数
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高島颯太, 松田裕亮, 烏井昭宏, 元谷 卓, 道木加絵
2. 発表標題 3 自由度インチワームの垂直荷重特性
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高島颯太, 鳥井昭宏, 元谷 卓, 道木加絵
2. 発表標題 3自由度インチワームの壁面走行
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大庭功嗣, 元谷 卓, 道木加絵, 鳥井昭宏
2. 発表標題 小型移動ロボットへの非接触給電における二次側電圧の変動抑制
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihiro Torii, Hiroaki Miyake, Suguru Mototani, Kae Doki
2. 発表標題 The evaluation of a miniature robot using electromagnetic force
3. 学会等名 european society for precision engineering and nanotechnology, 21st International Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suguru Mototani, Shuhei Otake, Kae Doki, Akihiro Torii,
2. 発表標題 Wireless Power Transfer System to a Small Mobile Robot with Load Fluctuation
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering (ICEE) Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田裕亮, 鳥井昭宏, 元谷卓, 道木加絵
2. 発表標題 インチワーム型マイクロロボットの変位
3. 学会等名 令和3年度、電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合亮佑, 鳥井昭宏, 元谷卓, 道木加絵
2. 発表標題 鉛直振動を用いた浮上機構の浮上量と振動振幅
3. 学会等名 令和3年度、電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合亮佑、鳥井昭宏、元谷 卓、道木加絵
2. 発表標題 圧電素子を用いた浮上機構の浮上特性
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田裕亮、鳥井昭宏、元谷 卓、道木加絵
2. 発表標題 圧電素子の变形速度 による電磁石の位置 保持への影響
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大竹修平、元谷卓、道木加絵、鳥井昭宏
2. 発表標題 小形移動ロボットへのATAC式を用いた非接触給電におけるLCの設計
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本稜、元谷卓、道木加絵、鳥井昭宏
2. 発表標題 立体スパイラルコイルを用いた海中非接触給電におけるコイル間角度と伝送効率
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田裕亮、鳥井昭宏、元谷 卓、道木加絵
2. 発表標題 小型移動ロボットの 圧電素子取り付け場 所が電磁石の位置保 持へ及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河合亮佑、鳥井昭宏、元谷 卓、道木加絵
2. 発表標題 圧電素子を用いた浮 上機構の電力
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2021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
研究 分担者	道木 加絵 (Doki Kae) (00350942)	愛知工業大学・工学部・教授 (33903)	
研究 分担者	元谷 卓 (Mototani Suguru) (80733443)	愛知工業大学・工学部・准教授 (33903)	

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
---------	---------