

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00647

研究課題名(和文) テザー係留飛行ロボットと昇降機能付風力発電器を用いた高高度風力発電システムの開発

研究課題名(英文) Development of a High Altitude Wind Power Generation System Using a Tethered Flying Robot and a Wind Power Generator with Elevation Function

研究代表者

高橋 泰岳 (Takahashi, Yasutake)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：90324798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、欧米では再生エネルギー活用の一環として風力発電に注目が集まっており、さらなる効率と稼働率の向上を目指して、高空の風力を活用する風力発電システムの研究が行われている。そこで、今回の課題では、自然エネルギーを有効利用し、建設コストが小さい空中風力発電システムとして、カイトやパラグライダーに各種計測装置や風力発電装置を取り付けた自律テザー係留型飛行ロボットシステムを提案し、その小型プロトタイプを設計、製作し、屋外での実験を通してその可能性や問題点を明らかにした。また、さらなる大型化を見据え、カイトの飛行シミュレータを用いて飛行制御アルゴリズムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生エネルギーの一つである風力による発電は、現在、地上や洋上で大型風車を用いた風力発電が主流である。しかし、地上では山や建築物の多いため、十分な定常的な風力を得ることができず、稼働率が低い。洋上では地上に比べてより大きな風力を得ることができるが、その高度は100m程度であり、より上空ではより大きな風力を得られることから、世界では高高度風力発電の研究が進められている。本研究は日本の風力エネルギーを活用するコミュニティにおいて、空中風力発電の研究の有用性や重要性を議論するという学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In recent years, wind power generation has been attracting attention in Europe and the United States as part of the utilization of renewable energy sources, and the efficiency of wind power generation has been increasing. We conducted research on wind power generation systems that utilize high-altitude wind power to increase the availability and capacity utilization. We have developed a system that effectively utilizes natural energy and lowers the construction cost of airborne wind power generation. The system consists of an autonomous kite or paraglider with a variety of measuring devices and a wind turbine generator. We proposed a tethered flying robot system, and designed and built a small prototype of it to be used outdoors. The possibilities and problems were clarified through experiments. We have also developed a flight control algorithm for a larger aircraft by using the kite flight simulator.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：空中風力発電

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 空中からの情報収集システムとして、気球を使うシステムやヘリコプタ等の航空機を使うシステム等が研究されているが、気球を使う場合ヘリウムガスの常備が必要であり、航空機を使う場合燃料の制限により長時間の活動が困難である。そこで、申請者は自然エネルギーを最大限利用したモニタリングシステムを目指し、パラグライダーやカイトをモデルとした飛行ロボットを提案し、開発を進めていた。

(2) 一方で、風力発電が今後の重要な自然エネルギー供給手段での1つであると考えられ、風力発電では風況の良い場所の選択が主要な要素であるが、高高度での定常的な風況を利用するアイデアが長年提案されてきた。このような高空における風力発電技術は未だに発展途上であり、海外でも米国、オランダ、イタリア等で開発が精力的に行われている。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまで開発してきたカイト型テザー係留型飛行ロボットをさらに改良し、このシステムのテザーを利用して重量物を自動昇降可能なマウントを新たに開発することで、高高度に風力発電装置を引き上げることが可能にし、その発電能力を実証実験によって明らかにする。

(2) さらに、上空での運動性能を高め、様々な風の状況に対応して飛行ユニットと風力発電装置を安全に制御する制御器を開発することを目指す。飛行ユニット部に制御ラインを巻き取り・巻き出しを行うアクチュエータを搭載し、制御ラインを制御することにより左右旋回を可能にし、カイト型テザー係留型飛行ロボットでは高度の制御しかできないところを、三次元空間を自在に運動できるシステムに拡張する。

### 3. 研究の方法

(1) カイト型テザー係留型飛行ロボットのテザーを利用し、風力発電器を自動昇降可能なマウントを新たに開発し、高高度に風力発電装置を引き上げ、その発電能力を実証実験によって明らかにする。

(2) カイトの制御ラインを制御し、能動的に飛行させることによって、見かけの風量を増大させ、より効率的な風力発電に繋がる。そのための能動的な飛行として、8の字を飛行軌道に描く制御器を開発し、シミュレータによってその有効性を示す。

### 4. 研究成果

(1) 開発した空中風力発電システムの模式図を図1に示す。このシステムはスレッドカイトを上空に飛翔させ、発電ユニットを係留する。発電ユニットは、カイトのテザーラインに沿って昇降可能なマウントに軽量の風車、発電機と発電容量センサを搭載している。またスレッドカイト本体下部には風速計を搭載し、それらの情報を無線通信にて地上に送信する。

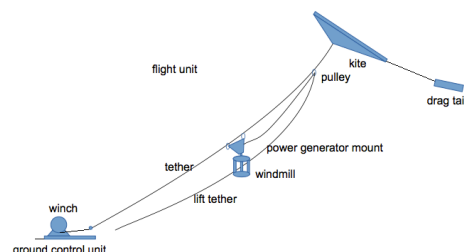


図1 高空風力発電システム模式図[1]

(2) 図2に抗力型垂直軸風車を用いたフライ・ゲン方式の実験の様子と発電ユニットの例を示す。風車は小型の垂直軸風車や水平軸風車を試した。

(3) 水平軸風車は風向きに合わせて風車を制御する必要があるが、風が強いときは風車自体が大きく揺れ、カイトを係留するためのテザーに衝突したり絡まることから、安定した風力発電が難しいことを確認している。

(4) 垂直軸型風車は硬質な翼を利用した揚力型風車やナイロン製の翼を利用したS字抗力型垂直軸風車の試験を行った。垂直軸型風車は、回転軸を風に対して垂直にすることができさえすれば、どの方向から風が来ても安定した風力発電が行える。硬質な翼を利用した揚力型風車は比較的重量があるため、重力によって回転軸を概ね垂直に保つことができ、水平軸風車に比べて安定した風力発電が可能である。しかし、ナイロン製の風車と比べて重量がかさむことと、自己駆動性が低いいため、十分な風速を必要とする。一方で、ナイロン製の翼を利用したS字抗力型垂直軸風車は



(a) 実験中の様子 (b) 発電ユニット

図2 抗力型垂直軸風車を用いたフライ・ゲン方式の実験の様子と発電ユニットの例

軽量で、折り畳みが可能なため搬送や保管が容易であり、抗力型のため自己機動性が高く、小さい風速でも風力発電可能であるが、風に流されて回転軸を垂直に保てないため、強風時には逆に発電できない状況も確認している。

(5) 上空に風車を持ち上げるプラットフォームを停留させ、停留した状態で風車による風力発電を行うだけでも、前述の通り、風量や稼働率の面で優位ではあるが、プラットフォームを意図的に回転させ、見かけの風量を増大させることで、より効率的な風力発電が期待できる。多くの8の字飛行の提案手法では、飛行する8の字の軌道を定め、これに沿うようにリアルタイムにカイトの制御ラインをコントロールする。人による8の字飛行の制御の経験から、予め決められた軌道に沿って飛ばすというよりは、タイミング良く制御ラインを制御することによって、比較的安定した8の字飛行を実現できることがわかった。そこで我々は、カイトの姿勢角に応じた単純な切り替え制御（ヒステリシス制御）で比較的安定した8の字飛行が実現可能であることを、シミュレーションを通して検証している。

(6) 図3に8の字飛行中のカイトの姿勢角の時系列を示す。実線で描かれている姿勢角はカイトの操舵角を時計回りに回転させた時であり、点線で描かれている部分は操縦角を反時計回りに回転させた時である。また、8の字飛行は、カイトの姿勢角がある閾値を超え場合に操舵角を反時計回りに、もう一つの閾値を下回った場合に操舵角を時計回りに制御すれば良いことがわかる。

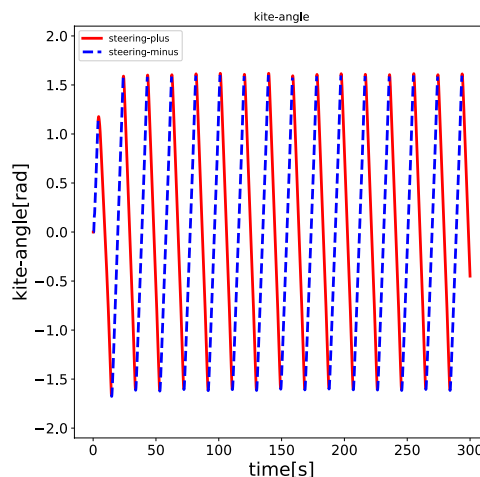


図3 8の字飛行中のカイトの回転角と操舵角[3]

(7) そこで、カイトの姿勢角の閾値 $\theta$ を用意し $\theta$ を超えると反時計回りにカイトの操舵角を切り、 $-\theta$ を下回ったときに時計回りにカイトの操舵角を切る。これをヒステリシス制御とここでは呼ぶ。複数の風況状況においてヒステリシス制御を行ったとき、フォイルカイトの飛行挙動がどのように変化するか検証した。

(8) 図4に風況を変化させたときのヒステリシス制御による飛行軌道の例を示す。図4では風速平均を秒速9mにし、風速に変化しない場合、正弦波で周期5秒、振幅1m/秒の変化をさせた場合、風速の変化にDryden Wind Turbulence Modelを用いた場合でヒステリシス制御を行った。風速に変化がない場合、飛行が安定し、飛行軌道が一定のアトラクタに収束することがわかる。正弦波やDryden Wind Turbulence Modelによる風速の変化を加えても、十分許容できる範囲で8の字飛行が安定して行えることがわかった。これらの実験から、8の字飛行の軌道を予め用意しなくても、またその軌道に沿うような制御を行わなくても、カイトの姿勢角のみに応じて操舵角を制御するだけで、安定した8の字飛行が可能にできることがわかった。飛行経路を指定する制御では、カイトの姿勢角のみではなく、3次元空間上の位置を高度計やGPSデータなどで計測する必要があるが、ヒステリシス制御では姿勢角のみの計測で済み、カイトに搭載するセンサ機材や制御器の簡素化に寄与するものと考えられる。ヒステリシス制御の制御パラメータ、具体的には閾値 $\theta$ の変化が飛行経路や見かけの風速、テザーの張力に及ぼす影響も調査している。

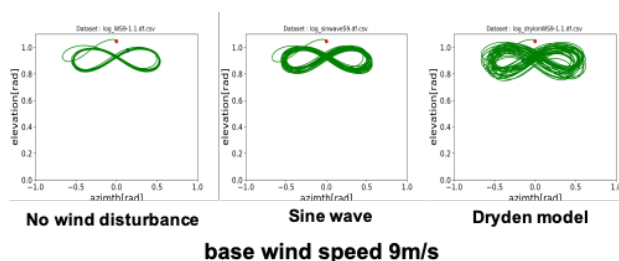


図4 ヒステリシス制御による飛行軌道の例

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 3件）

1. 発表者名 近藤智行, 形川雅文, 高橋泰岳, 長尾晃一郎, 東浦邦弥
2. 発表標題 高空風力発電のためのヒステリシス制御によるカイト飛行の検証
3. 学会等名 第40回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yasutake Takahashi, Yusuke Maruyama, Tairo Kusagaya, Shigeo Yoshida, Kazuo Arakawa, Hiroki Endo, Kenji Uchiyama, Kazuichi Seki, Takeo Watanabe
2. 発表標題 High-Sky Wind Energy Generation on a Tethered System
3. 学会等名 Airborne Wind Energy Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki T. Endo, Kazuo Arakawa, Gonzalo Sanchez-Arriaga, Hironori A. Fujii, Hiroshi Okubo, Yasutake Takahashi
2. 発表標題 Experimental Setup to Study Airborne Wind Energy Generation Using a Train of Kites
3. 学会等名 Airborne Wind Energy Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 形川 雅文, 近藤 智行, 高橋 泰岳
2. 発表標題 カイトとプロペラ式風車を用いた高空風力発電の試み
3. 学会等名 第39回風力エネルギー利用シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤智行, 高橋泰岳, 遠藤大希
2. 発表標題 連凧を用いた小型高空風力発電の試み -連凧を用いた高空風力発電実現のための計測システムの開発-
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第23期総会・講演会講演
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 智行, 高橋 泰岳
2. 発表標題 パーティクルフィルタを用いたフォイルカイトの視覚トラッキングと状態推定
3. 学会等名 第26回インテリジェント・システム・シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 近藤智行, 高橋泰岳, 小島令子
2. 発表標題 カイト型テザー係留飛行ロボットを用いた小型風力発電システムの試み
3. 学会等名 日本機械学会2016年度年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masafumi Narikawa and Yasutake Takahashi
2. 発表標題 Hysteresis Control of a Kite Flying Figure-of-Eight Maneuvers
3. 学会等名 Airborne Wind Energy Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 東浦 邦弥, 形川 雅文, 長尾 晃一郎, 高橋 泰岳
2. 発表標題 スレッドカイトと垂直軸風車を用いた空中風力発電実験
3. 学会等名 第41回風力エネルギー利用シンポジウム,
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京都立大学発・宇宙テザーから空中風力発電へ, 藤井裕矩, 丸山勇祐, 中嶋智也, 大久保博志, 高橋泰岳, 草谷大郎, 山本広樹, 電気評論, pp. 65-72, May, 2020

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