

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 23 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560444

研究課題名（和文）屋外飛行のための飛行船の外乱適応型制御システムの最適化と実用化と屋外飛行実験

研究課題名（英文）Study on optimization and practical use of adaptive disturbance rejection control systems for outdoor flight of an airship and outdoor flight experiments

研究代表者

山田 学 (YAMADA MANABU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：40242903

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、実用的な飛行船の自動航行制御システムを開発することである。具体的な主要研究成果の一つは、3次元空間に拡張された有用かつ実用的な運動制御問題を解き、風から受ける力をオンラインで推定し、風外乱を受けても任意の希望の地点にすばやくかつスムーズに移動し静止し、ある与えられた領域内にとどまり続ける実用的な適応制御系の設計法を導出したことである。飛行実験やシミュレーションにより成果の有用性を実証した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop some practical automatic control systems for an underactuated airship. One of our main results is to solve some useful 3-dimensional control problems and to present some adaptive control systems to guarantee asymptotical disturbance rejection for the case where the dynamics of the airship are subjected to bounded uncertainties in the presence of a unknown persistent wind disturbance. Many flight simulations and experiments have been performed and the effectiveness of the proposed control systems has been demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論、航空宇宙工学、飛行船、風外乱抑制、適応制御、自動操縦

1. 研究開始当初の背景

近年、情報通信やリモートセンシング（環境や交通流の監視）などの観点から飛行船が注目されている。それは飛行船が他の航空機に比べて、安全性が高く、長期飛行や空中静止が可能であるというユニークな利点を有しているからである。特にヘリコプターに比べて、安価で墜落や騒音・振動の心配はなく、人工衛星に比べても、安価で回収・修理が容易等の特徴を持っている。このような特徴を利用して、最近ではレスキュー・空撮・交通流監視・環境観測など、様々なプロジェクトに応用されつつあり、その代表的なプロジェクトの一つが、「成層圏プラットフォーム構想」である。これは文部科学省と総務省の共同プロジェクト（ミレニアムプロジェクト）として、飛行船を人工衛星に代わる通信・放送の中継基地等に利用する大型プロジェクトである。本学でも本研究代表者が2011年3月まで所属した極微デバイス機能システム研究センターでは、光・電子デバイス技術や制御技術の研究成果を応用し、無人で安全に長期飛行でき、かつ軽量・小型で扱いやすい実用的な“ソーラー飛行船システム”の開発プロジェクトをセンターの主要プロジェクトとして位置づけ研究を進めている。以上の状況を背景に、本研究では、そのプロジェクトの一つとして実用的な飛行船の自動航行制御システムの開発および実機に基づいた飛行シミュレーションおよび実験による制御性能の実証を研究するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は実用的な飛行船の自動航行制御システムを開発し、無人飛行船を用いた飛行実験により有効性を実証することである。飛行船の制御を考える上での主な問題点はつぎの3点である。

・風外乱と非線形性の影響：

飛行船は風外乱の影響を受けやすく、比較的弱い風であっても、風を船体の斜めから受けることにより、任意の希望の地点への移動や静止が困難になりやすい。また、風は時間とともに変動し、正確な測定も困難である。さらに風により飛行船が受ける抗力は、風と飛行船の相対速度の非線形関数であるとともに飛行船の姿勢にも依存する。また、風により飛行船が受ける抵抗係数などの空力特性を正確に測定することは困難であり、不確かさや時間変動をもつ。他にコリオリ力など、飛行船の運動方程式は強い非線形性をもつ。

・非ホロノミック拘束：

飛行船の位置と姿勢を制御するための主な推進装置は、一般的に左右のプロペラと舵の

みであるため、制御入力に対する制御量の自由度が少なく、例えば直進と回転はできるが、横方向には入力を加えることができないという非ホロノミック拘束（劣駆動）と呼ばれる制約をもつ。そのため、車の車庫入れと同じように前進・後進の最適な切替えしなど、巧みな制御が必要とされる。

・ペイロードの制約：

飛行船はヘリウムガスの浮力で浮いているため、搭載できる装置（電源システムやアクチュエータなど）が大きく制限される。そのため、効率的で無駄のない最適な制御方式が必要である。

従来では、飛行船の自律飛行制御に関する研究の報告は数少ない。また従来研究では、コントローラに不連続な切替え器を用いることで不安定化や振動を起しやすかったことや、特異点が存在し大域的安定性が保証されていないこと、実用上重要なロバスト安定性および未知風外乱の抑制がほとんど考慮されていないこと、風により飛行船が受ける粘性抵抗係数などの空力特性の正確な情報が事前に必要で、その値に誤差があると不安定化を起しやすかったこと、コントローラ的设计が複雑などの問題点が指摘されている。

そこで、平成19～21年度において、科学研究費補助金の援助の下、本研究代表者は2次元平面上でつぎの制御性能を保証する実用性の高いコントローラを開発した。

・飛行船の物理パラメータに不確かさがあっても、制御系の大域的指数安定性を保証するロバスト安定化コントローラ。

・風速・風向が一定の風外乱を受けても、任意の希望の地点にすばやく移動し静止できる外乱抑制コントローラ。

本研究では、上記の成果を、3次元空間における運動制御系に拡張し、劣駆動飛行船の位置および姿勢を同時に希望どおりに制御する制御系の設計法の開発と有用性の実証を主な研究目的とした。具体的な研究目標を次の3点である。

(1) 外乱適応型自動制御システムの実用化：平成19～21年度における本研究代表者の成果を3次元空間における運動制御系に拡張し、風力だけでなく風向もオンラインで推定し、任意の希望の地点にすばやくかつスムーズに移動し静止できるコントローラ的设计法を開発する。実用上の観点から、ロバスト性も保証するコントローラ的设计法も開発する。

(2) 揺れを抑える飛行船制御システムの解析と設計：耐風性能の向上のため、実験機を見直し、飛行船のアクチュエータの数量・配置の最適化を行う。さらに自動制御システムも見直し、3次元空間における運動制御系の横・縦揺れを低減できる飛行船制御システムを開発する。

(3) 飛行実験による有用性の実証：実機に基づいた飛行シミュレーションおよび実験を行い、有効性を実証する。

3. 研究の方法

まず、上記の研究目標(1)の理論研究(外乱適応型自動制御システムの開発)を解決する鍵となるアイデアは、カルフォルニア大学バークレイ校機械制御研究室の富塚誠義教授と本研究代表者が共同で開発し高い評価を得ている、座標変換に基づいた新しい制御手法である。この座標変換は、機体座標系における横方向速度と横方向位置に時変な指数関数の重みを掛けるこれまでにない新しい手法であり、飛行船システムにこの時変な座標変換を導入しシステムを安定化すれば、まず飛行船の横方向の位置と速度を優先的にゼロに収束させ、その後、姿勢角度・角速度、進行方向の位置・速度の順で零に収束させることを可能にする。その結果、車の巧みな車庫入れ動作と同様に前進・後進を自動的かつ滑らかに切り替え、無駄なく効率的な動きで自律定点滞空を実現できる利点をもつ。そこで本研究では、上記の手法に基づいて理論研究を進展させ、研究目標(1)である外乱適応型自動制御システムの開発を実施した。

つぎに、研究目標(2)の揺れを抑える飛行船制御システムの解析と設計においては、実際の飛行船のデータが不可欠であったため、風速・風向計、3軸ジャイロ、GPSなどのセンサーを搭載し、無線LANによりデータを地上に無線送信できる小型飛行船システムを製作し、屋外での飛行実験を実施し、飛行船の運動データの蓄積と解析を行った。その解析結果に基づき、実験機の改良を試みた。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

まず、研究目標(2)の揺れを抑える飛行船制御システムの解析と設計における研究成果は以下のとおりである。

① 揺れを抑える飛行船制御システムの解析と設計：

まず、風速・風向計、3軸ジャイロ、GPSなどのセンサーを搭載し、無線LANによりデータを地上に無線送信できる小型飛行船システムにより飛行実験を実施し、飛行船の運動データの蓄積と解析を行った。その解析結果に基づき、実験機を改良し、耐風性能の向

上を行った。図1と2に示すように、本システムは高出力の電動プロペラを4基搭載し、その配置を工夫することで風に対抗できる高い推進力を有し、さらにサーボモータによりプロペラを自由に制御できるため、安定な発着陸や高度などの制御も容易にすばやく実現できるという特徴をもつ。実機による飛行実験を実施し、有用性を検証した。

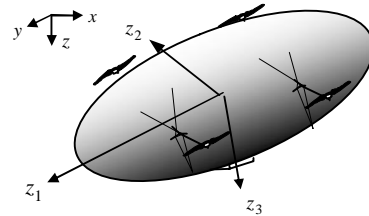


図1 小型飛行船のモデルとプロペラの配置

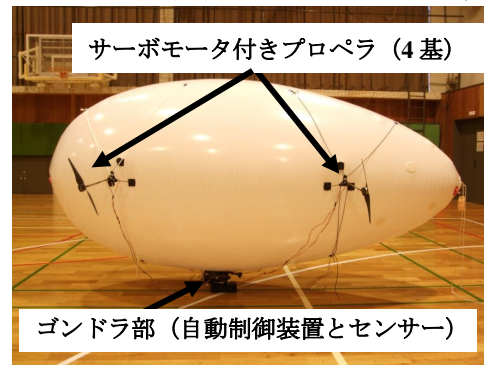


図2 小型飛行船の実験機 (全長4m)

つぎに、研究目標(1)の、外乱適応型自動制御システムの実用化に関する研究成果は以下のとおりである。

② 自動制御システム開発のために基礎研究：

まず、自動制御システム開発のために基礎研究として、無風状態での位置と姿勢の制御法について考察した。従来の制御法は、コントローラに不連続な切替え器を用いることで不安定化や振動を起しやすかったことや、特異点が存在し大域的安定性が保証されていなかった。

本研究では、まず上記の「3. 研究方法」で述べた連続で滑らかな関数からなる座標変換のアイデアを用いて、3次元に拡張した劣駆動系の安定化問題を考察し、飛行船などの劣駆動系を大域的指数安定化できる新しい補償器の設計法を提案した。提案法の利点は以下のとおりである。

・提案するコントローラは、滑らかな座標変換と定数ゲインのみから構成され、構造が簡単であり、切替えなどの不連続要素をもたないため、飛行船は滑らかに振動なく動作し、かつ特異点がなく、どんな初期状態(位置・姿勢・速度など)からでも、任意の希望の状態を指数的にすばやく達成できる。さらに、

設計問題をある簡単な線形時不変系に対するよく知られた標準的な極配置問題に帰着させ、設計法を単純化した。

・従来の制御法では、ノイズの影響の大きい速度・角速度の測定値を必要としており、ノイズによって制御性能が劣化してしまうことがある。本研究では、上記の連続で滑らかな関数からなる座標変換のアイデアを用いて、実用上の観点から、速度・角速度情報を用いずに、飛行船などの劣駆動系を大域的指数安定化する新しい安定化補償器の設計法を提案した。制御系は、位置・角度情報と飛行船の運動方程式から速度・角速度情報を推定する最小次元オブザーバを構成し、それらの推定値をフィードバックする。設計問題をよく知られた線形時不変系に対するオブザーバの設計問題に帰着させ、オブザーバの次数低減と設計法の単純化を達成した。

・従来の制御法では、飛行船の特性変動や不確かさが考慮されておらず、これらにより、制御性能の劣化や不安定化を引き起こしてしまうことがある。本研究では、実用上の観点から粘性係数などに不確かさをもつ3次元に拡張された劣駆動系のロバスト安定化問題を考え、全ての初期値に対して飛行船や船などの劣駆動系を指数安定化できる新しい安定化補償器の設計法を提案した。設計問題をよく知られた線形時不変系に対する2次安定化問題に帰着させ、設計法を単純化した。

③外乱適応型自動制御システムの開発研究：

本研究では、上記の成果を発展させ、風向・風速が一定で未知の持続的な風が飛行船に外乱として加わる場合について考察し、このような風外乱を受けても、大域的指数安定性を保証し、かつ任意の希望の地点にすばやくかつスムーズに移動し静止できる新しいコントローラの設計法を導出した。提案法の利点は以下のとおりである。

・提案するコントローラは、滑らかな座標変換と積分器とパラメータ推定器と定数ゲインのみから構成され、構造が簡単であり、切替えなどの不連続要素をもたないため、飛行船は滑らかに振動なく動作し、特異点がなく、どんな初期状態（位置・姿勢・速度など）からでも、未知の風外乱に対して任意の希望の状態を指数的にすばやく達成できる。さらに、パラメータ推定器の導入により、正確な測定が困難な風速や空力係数などをオンラインで推定する実用的な適応補償器が得られている。そのため、風速計を搭載する必要はなく、搭載重量を軽量化できる。また、3次元に拡張された提案法は、風向を目標角度として常に船首をその目標角度に追従させるた

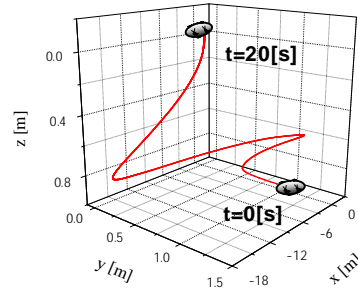


図3 外乱を推定し抑制する飛行船の飛行軌跡（目標位置（原点）へ移動し静止）

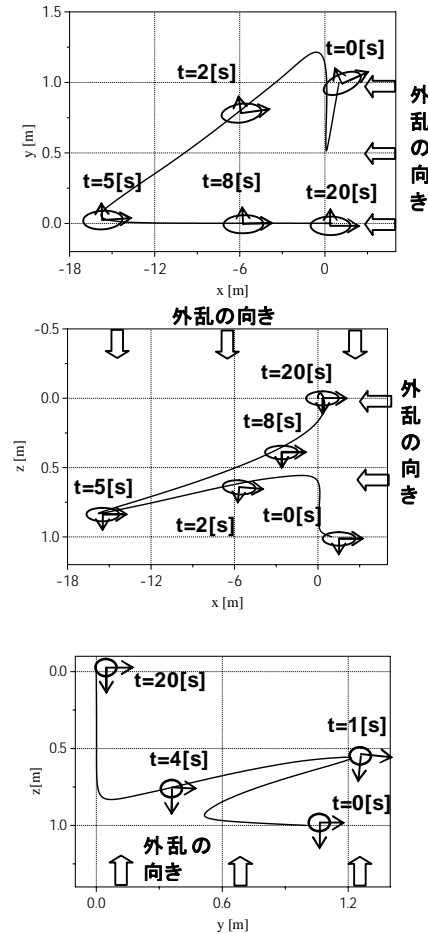


図4 飛行船の飛行軌跡（上図：x-y平面、中図：x-z平面、下図：y-z平面）

め、外乱を受けても、飛行船をある与えられた領域内に保持できるという利点をもつ。

・ある時変で滑らかな座標変換を導入することにより、この劣駆動系に対する持続的な風外乱の抑制問題を、ある簡単な線形時不変系の安定化問題に帰着させている点である。設計問題をよく知られた線形時不変系の極配置問題に帰着させ、設計法を単純化している。

・実験機に基づいた飛行シミュレーションに

より本手法の有用性を実証した。シミュレーションは様々な持続的風外乱の下で初期状態などを変えて数多く実施した。その中で典型的な結果を図3と図4に示す。これらの図から、提案する制御系は、未知かつ一定の風外乱をオンラインで推定かつ抑制し、目標の位置（原点）へ移動し、同時に風外乱に対抗する望ましい姿勢（機首を風に向ける姿勢）を達成できることをわかる。その結果、本手法を用いれば、持続的な風外乱の状況下でも飛行船システムの状態は全てすばやくほぼ零に収束し、その後長時間にわたり原点付近に高い精度で定点滞空しており、持続外乱に対して優れた抑制性能が得られることがわかる。

④その他の成果：

上記の成果の一部を、4ロータ小型ヘリコプタや車両型ロボットなどの劣駆動非ホロノミックシステムへ応用し、従来法の問題点を解決する新しい制御系の設計法を提案した。例えば、これまで未解決であった4ロータ小型ヘリコプタシステムの厳密な線形化や最適制御法への応用、およびデジタル制御法に基づいた車両型ロボットを含む非ホロノミックシステムの大域的安定化と目標値への完全追従補償器の設計法などを与えた。このように、本手法は様々な劣駆動非ホロノミック系の制御にも応用が可能であり、飛行船以外の劣駆動非ホロノミック系の制御技術の発展にも大きく貢献できる成果である。

(2)得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究では、飛行船の位置および姿勢を制御する問題について考察している。飛行船はコリオリ力などの非線形項をもつ非線形システムであり、その状態方程式は船と同形である。また、多くの飛行船は船と同様、プロペラと舵が船体運動の制御手段であり、非ホロノミックな拘束をもつ劣駆動機械系の一つである。このシステムの制御の難しさは、通常の連続で静的なフィードバック則では安定化できない点である。飛行船や船などの非ホロノミックシステムの安定化制御手法に関しては、船の制御問題を中心にこれまでに数多くの研究が報告され、不連続フィードバックに基づいた方法や時変フィードバックによる方法など数多くの興味深い手法が提案されている。しかしこれらの従来法の多くは制御目標がシステムの安定化に限定されており、実用上重要な制御問題、例えば、風外乱に対して大域的漸近抑制を保証できる制御手法などは明らかにされていない。

それに対して本研究は、座標変換に基づいた新しい制御系を提案した。この座標変換に

基づく手法は、飛行船の前進・後進を自動的に切り換え、船首をすばやく風に向け、風に対して効率的で無駄のない動きを実現できるという優れた利点をもつ。本研究の独創的な点は、この座標変換法を応用し、高度で実用上重要な制御問題に数多く解決したことである。具体的には、速度情報を必要としないオブザーバによる安定化や物理係数に不確かさをもつ飛行船システムのロバスト安定化、さらにこれまで未解決であった未知の風外乱に対して大域的漸近抑制を保証する制御系の設計法なども与えており、独創性および有用性が高い。さらに本手法は車両型ロボットなど様々な劣駆動非ホロノミック系の運動制御にも応用されており、劣駆動系全般の制御技術の発展にも大きく貢献できるインパクトの高い成果である。

(3)今後の展望

本研究の主目的は、屋外飛行のための飛行船制御の実用化であるが、そのためには、つぎの問題点を解決し、上記の成果を発展させることが必要と思われる。

①ハイゲインフィードバックの回避：

上記の提案法は、フィードバック補償器に指数関数を含むため、時間とともにハイゲインとなりセンサーノイズに弱い。

②時間変化する未知風外乱への対策：

上記の提案法は、定常風を扱い、風外乱が時間変化する場合を考慮していない。

③4元数表現の導入：

上記の提案法は、姿勢角にオイラー角を用いているため、特異点が発生し運動が制限されてしまう。運動範囲を広げるため、4元数表現に基づいた制御法が必要である。

これらの問題点を解決する鍵となる制御法が「実用追従制御法」であり、追従誤差を零でなく、任意に与えられた値以下に保証することを目的とする、今年本研究代表者により提案された新しい制御法である。この手法により制御対象の非線形性・非ホロノミック性を緩和できることに着目し、すでに車両型ロボットなどの簡単な非線形系に適用し、ハイゲインフィードバックを回避でき、さらに非線形系の制御問題をある簡単な線形系の制御問題に帰着させ、目標値追従を達成する低ゲインフィードバック補償器の設計に成功した。

以上の背景の下、今後はこの実用追従制御法を3次元空間での飛行船に拡張し、飛行船の非線形系制御問題を簡単な線形系の制御問題に帰着させ、実用追従制御法のもつ非線形性・非ホロノミック性の緩和という特徴を利用して、これまで未解決の上記①-③の問題点を解決し、最適追従制御問題や外乱に対する感度最小化問題などを解くことである。

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6件)

- ① M. Yamada、他3名(第1番目)、Adaptive robust control of an underactuated nonholonomic airship - asymptotical rejection against unknown wind disturbance -, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Control Applications (IEEE-CCA)、査読有、2010、pp.1844-1849
- ② M. Yamada、他3名(第1番目)、Adaptive Robust Control of an Underactuated Nonholonomic Airship, Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines、査読有、2010、pp.1210-1218
- ③ 山田学、多喜康博、舟橋康行、定常風に対する飛行船システムの大域的な位置と姿勢の制御、日本機械学会論文集C編、査読有、76巻767号、2010、pp.1770-1779
- ④ 山田学、高野洋瑛、舟橋康行、高次チェインドシステムの大域的指数安定化制御-サンプル値制御法に基づいたオブザーバとフィードバック補償器の設計-、計測自動制御学会論文集、査読有、46巻4号、2010、pp.199-208
- ⑤ 山田学、市川靖高、舟橋康行、非ホロノミック二輪車両型移動ロボットシステムのサンプル値制御 -大域的指数安定化離散時間フィードバック補償器の設計-、計測自動制御学会論文集、査読有、46巻4号、2010、pp.209-218
- ⑥ 山田学、高野洋瑛、舟橋康行、非ホロノミック2次チェインドシステムの大域的指数安定化制御、日本機械学会論文集C編、査読有、76巻764号、2010、pp.875-885

[学会発表] (計6件)

- ① 江口 公規、山田学、3次元空間移動ロボットの实用追従制御、第13回計測自動制御学会制御部門大会、2013年3月8日、アクロス福岡
- ② 江口 公規、山田学、追従精度を指定できる3次元空間移動ロボットの追従制御、第13回計測自動制御学会制御部門大会、2013年3月5日、アクロス福岡
- ③ 森 啓多、山田学、4ロータ小型ヘリコプタの最適追従制御、第13回計測自動制御学会制御部門大会、2013年3月8日、アクロス福岡
- ④ 荒川悠太、山田学、車両型移動ロボットの实用追従制御、第13回計測自動制御学会制御部門大会、2013年3月8日、アクロス福岡

- ⑤ 小口和紀、山田学、外乱オブザーバに基づく4ロータ小型ヘリコプタの外乱抑制制御、第55回自動制御連合講演会、2012年11月17日、京都大学
- ⑥ 水野好昭、山田学、飛行船の風外乱適応制御、第54回自動制御連合講演会、2011年11月19日、豊橋科学技術大学

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称：陸空両用の移動体

発明者：山田学、江口 公規

権利者：名古屋工業大学

種類：特許

番号：特願 2013- 9856

出願年月日：2013年1月23日

国内外の別：国内

名称：全方位走行可能な陸空両用の移動体

発明者：山田学、平松大輝、江口 公規

権利者：名古屋工業大学

種類：特許

番号：特願 2013-32944

出願年月日：2013年2月22日

国内外の別：国内

[その他]

・受賞：

名称：論文賞

受賞者：山田学、太田進一、舟橋康行

受賞日時：2010年8月20日

受賞論文題目：高次チェインドシステムに対するオブザーバと安定化補償器の設計-座標変換とサンプル値制御に基づいた手法-

学会名：公益社団法人 計測自動制御学会

・ホームページ：

<http://mcontrol.web.nitech.ac.jp/yamam/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田学 (YAMADA MANABU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：40242903

(2)研究分担者 なし。

(3)連携研究者

水野 直樹 (MIZUNO NAOKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：30135404

大羽 達志 (Ooba YATSUSHI)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：90233254

山田 貴孝 (YAMADA TAKAYOSHI)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号：00273318