

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360191
 研究課題名 (和文) 高運動性能飛行船の外乱適応型自動制御システムの開発と実用化と屋外飛行実験
 研究課題名 (英文) Study on practical adaptive disturbance rejection control systems for a high mobility 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・准教授
 研究者番号：40242903

研究成果の概要 (和文)：本研究の目的は、高運動性を有する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、飛行船の物理パラメータに不確かさが存在してもシステムのロバスト安定性を保証し、かつ未知の風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できる実用的な適応制御系の設計法を導出したことである。数多くの飛行実験を実施し、その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 useful and practical automatic control systems for a high-mobility underactuated airship. One of our main results is to present some adaptive control systems to guarantee both robust global stabilization and 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 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
2007年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

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所属する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よる飛行実験での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下記の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。

本研究では、上記の問題点を解決し、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のため、具体的な研究目標を次の3点とした。

(1) 高運動性能を有する飛行船の設計製作：
従来の飛行船の制御システムを見直し、屋外でも高運動性能を実現できる実験機を製作する。

(2) 外乱適応型自動制御システムの開発：
風を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。

(3) 飛行実験による有用性の実証：
飛行船を用いた実機飛行実験を行い、数多くの運用試験により有効性を実証する。

3. 研究の方法

まず、上記の研究目標(2)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(2)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、上記の研究目標(1)の高運動性能を有する飛行船の設計製作においては、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、高運動性能を実現できる実験機を製作した。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

まず、第一の研究目標である、高運動性能を有する飛行船の設計製作における研究成果は以下のとおりである。

①高運動性能を有する飛行船の設計製作：

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、屋外でも高運動性能を実現できる実験機を製作した。本システムは高出力の電動プロペラを4基搭載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角度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。屋内および屋外飛行実験にて有用性を検証した。

つぎに、第二の研究目標である、外乱適応型自動制御システムの開発と実験による有用性の実証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、劣駆動系の安定化問題を考え、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同次元オブザーバの設計問題に帰着させ、設計法を単純化した。

・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。

・小型飛行船を用いた飛行実験により本手法の有用性を実証した。飛行実験は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2つの実験結果（以下では、「実験1」とよぶ）を示す。図1は「実験1」の場合の飛行船のシステムの状態の時間応答を示し、図2は重心の軌跡と飛行船の動きの連続写真を示す。これらの図から、本手法を用いれば、座標変換の効果により、まず飛行船の横方向

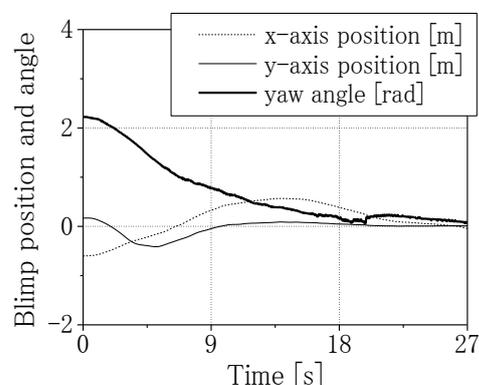


図1 飛行船の状態の時間応答図(実験1)

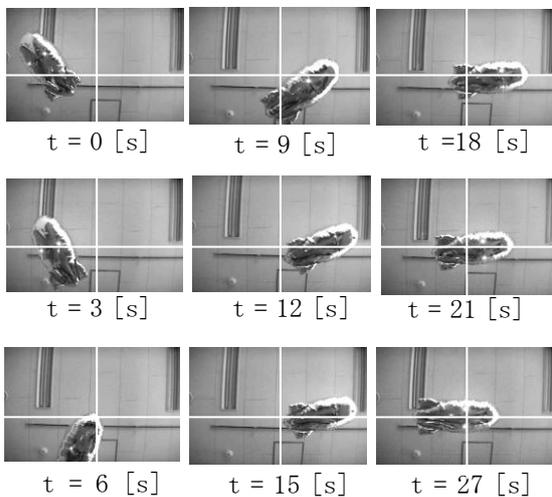
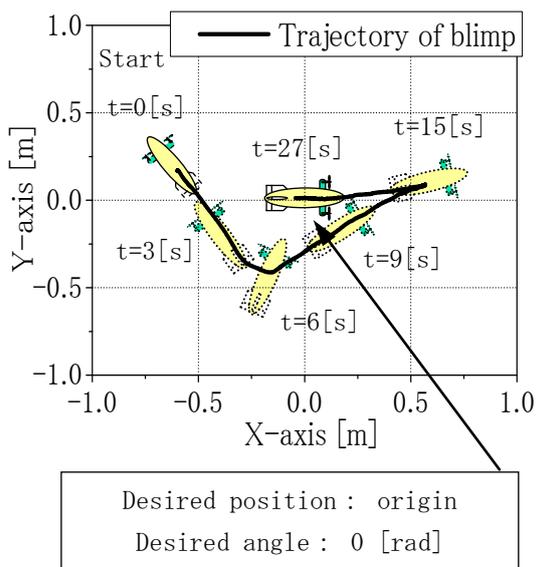


図 2 飛行船の飛行軌跡 (上図) と連続写真 (下図) (実験 1)

の位置を優先的にゼロに収束させ、その後、姿勢角度、最後に進行方向の位置の順で零に収束させることがわかる。その結果、滑らかで振動もなく、車の車庫入れのような巧みでむだがない軌跡を与えており、最後に飛行船システムの全ての状態を希望どおり零に収束させていることがわかる。

③外乱適応型自動制御システムの開発研究：
さらに本研究では、上記の成果をさらに発展させ、風速などが一定であるが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的设计法を導出した。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、提案法を用いれば、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。

- ・積分器と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。

- ・小型飛行船を用いた飛行実験により本手法の有用性を実証した。飛行実験は持続的な風外乱の下で初期状態などを変えて数多く実施した。その中で典型的な実験結果 (以下では、「実験 2」とよぶ) を示す。図 3 は「実験 2」の場合の飛行船のシステムの状態の時間応答を示し、図 4 は重心の軌跡と飛行船の動きの連続写真を示す。これらから、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。

- ・上記の成果の一部を、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、

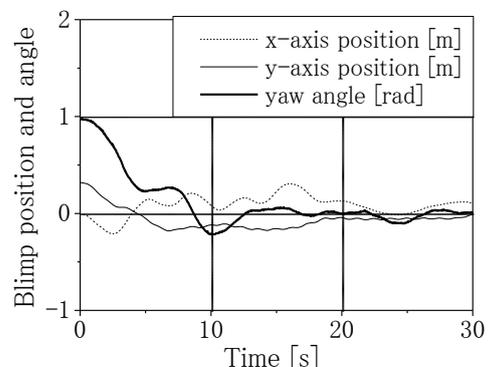


図 3 風外乱下での飛行船の状態の時間応答図 (実験 2)

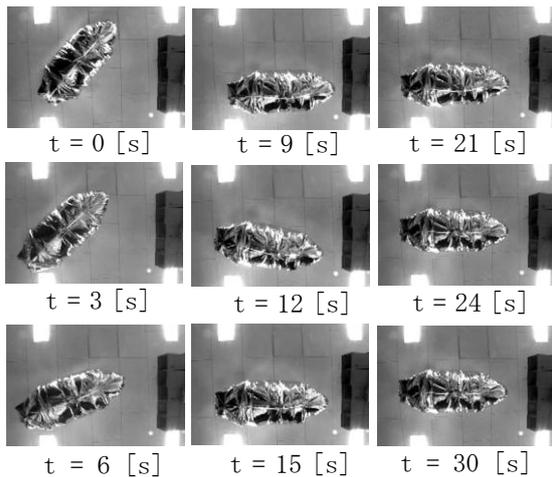
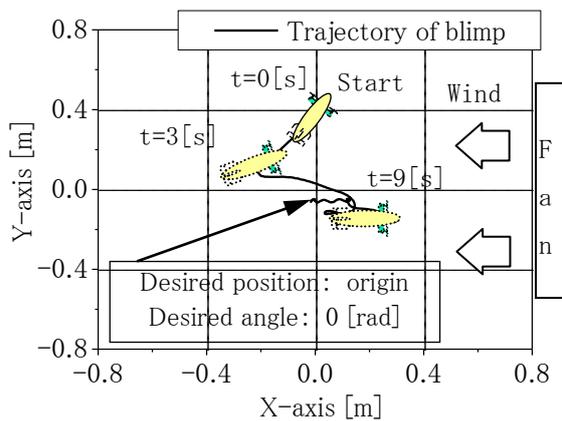


図4 風外乱下での飛行船の飛行軌跡（上図）と連続写真（下図）（実験2）

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デジタル制御により車両型ロボットを含む非ホロノミックシステムを大域的指数安定化する離散時間補償器の設計法や、物理パラメータをオンラインで推定しながら、車両のダイナミクスを含む非ホロノミックシステムを大域的指数収束させる適応制御補償器の簡単な設計法を与えた。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證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證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

本研究代表者は他のプロジェクトも先導しており、例えば平成18～20年度に総務省の戦略的情報通信研究制度（SCOPE）にて採択されたソーラー飛行船プロジェクトのサブリーダーを務めた。このプロジェクトは、他大学や企業などと共同で、災害時の通信の確保と災害状況の監視を目的とした無線基地局を搭載したテザー付ソーラー飛行船を開発し運用する応用研究である。その成果は高く評価され、テレビや各種新聞などで数多く報道された。この屋外運用飛行実験での経験を通じて、屋外飛行のための飛行船制御の実用化には上記の研究成果を以下の点について発展させることが必要と思われる。

- ① 風に対する過渡応答特性の最適化：
本研究では一定の風を受けても定常的に漸近抑制する制御法は提案したが、過渡特性を考慮していないため、初期状態や風によっては、船体が大きく流されてしまう可能性がある。
- ② 制御入力への制約に対する対策：
制御入力への制約が考慮されていない。そのため屋外で起こりやすい風の突発的な変動な

どにより、制御入力が飽和し制御性能が大きく劣化してしまうことがある。

③目標値追従制御システムへの拡張：

提案法は定点滞空制御に限定されている。広域地域の監視や風外乱の効率的な抑制を考えると、目標軌道に追従させる制御系も必要である。

④3次元運動制御系への拡張：

提案した制御系は2次元平面上の動きの制御に限定されているため風の変動の大きい屋外の場合、風の影響で縦・横揺れが発生し制御性能が大きく劣化してしまうことがある。

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 12 件)

- ① 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、掲載決定
- ② 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、掲載決定
- ③ 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
- ④ 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
- ⑤ 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
- ⑥ 山田学、三田英治、舟橋康行、劣駆動気球ロボットシステムのサンプル値制御によるオブザーバに基づいた速度計測不要な大域的指数安定化、日本機械学会論文集 C 編、査読有、76 巻 763 号、2010、pp. 635-645
- ⑦ 山田学、富塚誠義、不確かさをもつ劣駆動飛行船システムの大域的ロバスト安定化と飛行実験、日本機械学会論文集 C 編、査読有、76 巻 753 号、2010、pp. 646-655

- ⑧ 山田学、佐藤真吾、富塚誠義、速度情報が必要としない劣駆動飛行船システムの大域的指数安定化と飛行実験、日本機械学会論文集 C 編、査読有、75 巻 754 号、2009、pp. 1671-1679
- ⑨ 山田学、富塚誠義、劣駆動非ホロノミック飛行船システムの大域的指数安定化制御、計測自動制御学会論文集、査読有、45 巻 2 号、2009、pp. 99-104
- ⑩ 山田学、馬原功次、水野直樹、非ホロノミック二輪車両移動ロボットの適応制御-収束速度を指定する大域的指数安定化補償器の設計-、計測自動制御学会論文集、査読有、45 巻 2 号、2009、pp. 105-112
- ⑪ 山田学、太田進一、舟橋康行、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-、計測自動制御学会論文集、査読有、44 巻 12 号、2008、pp. 1034-1042
- ⑫ M. Yamada、他 3 名 (第 1 番目)、Robust global stabilization and disturbance rejection of an underactuated nonholonomic airship、Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications (IEEE-CCA)、査読有、1 巻、2007、pp. 886-891

[学会発表] (計 1 件)

- ① 山田学、劣駆動非ホロノミック飛行船のデジタル制御による大域的指数安定化、第 9 回制御部門大会、2009 年 3 月 4 日、広島大学

[その他] ホームページ等：

<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・准教授
研究者番号：40242903

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者 なし。