

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 24 年 4 月 2 日現在

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560258
 研究課題名（和文）多機能複合動作を有するロボット系のための統一的非線形制御アプローチ
 研究課題名（英文）A Unified Nonlinear Control Approach to Robots with Multiple Dynamic Motions
 研究代表者
 田中 一男 (TANAKA KAZUO)
 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
 研究者番号：00227125

研究成果の概要（和文）：近年、ロボットの多機能な複合動作実現のニーズが高まっている。本研究では、多機能複合動作を有するロボット系のための統一非線形制御アプローチの方法論を構築した。とくに、非線形ダイナミクスを多項式表現モデルに変換し、Sum of Squares 手法を理論的核とした効果的に制御系を設計する方法の開発に成功した。さらに、飛行ロボットのホバリング制御、軌道安定化制御に適用し、本研究の有効性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We develop a unified nonlinear control approach to aerial-vehicles /flying robots as an example of robots with multiple dynamic motions. We succeed in constructing an algorithm of transforming an original nonlinear system (motion of equations for aerial-vehicles /flying robots) to a polynomial system representation and developing a sum-of-squares based nonlinear controller design method for the transformed polynomial system. We demonstrate the utility of our approach through hovering and trajectory tracking control experiments of a flying robot.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：統一的非線形制御アプローチ, Sum of Squares (SOS), 飛行ロボット

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボットの多機能な複合動作実現のニーズが高まっている。しかし、このような系に対して個別な設計法が適用されており、統一的设计論としての枠組みが確立されていない。

(2) 多機能な複合動作を有するロボットの中でも、飛行ロボットの自律制御は極めて困難であるにもかかわらず、その需要が高まるものと予想される。

(3) 屋内探査用のマイクロ（手のひらサイズ）

飛行ロボットによる未知環境屋内探査は災害情報収集として利用可能であるが、自動制御困難性とペイロードの未確保が大きな問題となる。

2. 研究の目的

(1)本研究では、多機能な複合動作を有するロボットのための統一的非線形制御の方法論を確立する。

(2)一般に、非線形制御は線形制御に比べて、実システムへの適用が困難であるという側面を有する。本研究では、自然に、簡単に、効果的に非線形制御を実現する方法論を模索する。

(3) 非線形ダイナミクスを多項式表現モデルに変換し、Sum of Squares 手法を理論的核とした効果的に制御系を設計する方法を開発する。

(4) 屋内探査用のマイクロ飛行ロボットに小型のワイヤレスカメラのみを搭載し、ジャイロや加速度センサなど姿勢計測のセンサを搭載することなしに、ホバリングおよび軌道追従制御を成し遂げる。ワイヤレスカメラの映像は未知環境の状況把握のセンサとしても利用できる。

3. 研究の方法

(1) 非線形ダイナミクスを多項式表現モデルに変換し、安定な制御系を設計する安定条件を Sum of Squares の形で導出する。

(2) 制御系の安定性の保証は非常に重要ではあるが、実際の応用では、さらに制御性能を最適化したい要求が多い。そこで、与えられた評価関数の上限を最小化するような Guaranteed Cost Control の条件も Sum of Squares の形で導出する。

(3) 屋内探査用のマイクロ飛行ロボットシステムを開発し、小型のワイヤレスカメラのみを搭載した制御システムを構築する。

(4) 単体のカメラでヘリコプタの位置・姿勢の6自由度の情報を精度よく計測するシステムも開発する。また、機体振動やワイヤレスによる映像送信時に起きる画像の乱れを補償するロバストな画像処理システム構築を行う。

(5) 小型のワイヤレスカメラのみを搭載し、ジャイロや加速度センサなど姿勢計測のセンサを搭載することなしに、ホバリングおよ

び軌道追従制御実験を行い、その有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 非線形ダイナミクスを多項式表現モデルに変換する方法を提案した。本手法では、任意の非線形ダイナミクスを global に等価な多項式モデルに置きかえるアルゴリズムを提案した。

制御対象の非線形ダイナミクスと完全に等価な多項式モデルに対して、制御系の安定性を保証する多項式制御器を設計するための条件を Sum of Squares の形で導出した。

紙面の都合上、これらの詳細は割愛する。詳細については、下記の論文にまとめられている。

Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, A Sum of Squares Approach to Modeling and Control of Nonlinear Dynamical Systems with Polynomial Fuzzy Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.17, No.4, pp.911-922, August 2009.

(2)与えられた評価関数の上限を最小化するような Guaranteed Cost Control の条件を Sum of Squares の形で導出することに成功した。それゆえ、Guaranteed Cost Control の設計問題も MATLAB などの汎用的な制御系設計ツールで可解問題として定式化することに成功した。

紙面の都合上、これらの詳細は割愛する。詳細については、下記の論文にまとめられている。

Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, Guaranteed Cost Control of Polynomial Fuzzy Systems via a Sum of Squares Approach, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B, Vol.39, No.2, pp.561-567 April, 2009.

(3) 図1に示すような屋内探査用のマイクロ飛行ロボットシステムを開発した。また、小型のワイヤレスカメラのみを搭載して、ワイヤレスカメラでの vision feedback 制御システムの構築を行った。

ヘリコプタは垂直上下動、ホバリング、前後進など、飛行機には見られない飛行特性を持った飛行体であり、様々な局面に対し柔軟に対応することができるという長所を持っている。ヘリコプタの自律飛行の研究は長らく屋外用のヘリコプタを制御対象としたものが多かった。それらは主に GPS やジャイロセンサ、加速度センサなど多くのデバイスを搭載した高価な Inertial Measurement Unit を使ったものである。



図1 屋内探査用のマイクロ飛行ロボットシステム

一方、小型の無人ヘリコプタならば、コストパフォーマンスや現場までの輸送性の面で優れている。しかし、システムが非線形かつ軸の干渉を持ち、また、小型であるため慣性が小さく、入力信号に対して非常に敏感であるといった特性を持つため、小型ヘリコプタの自律制御は非常に難しい制御問題となる。現在は熟練のオペレータによって操縦されることが多い。小型ヘリコプタの自律制御が可能となれば、オペレータが不要となり、オペレータの視界外でも飛行が可能になるため、その応用範囲を大幅に広げられると考えられる。

小型ヘリコプタは最大積載量が小さいため、搭載できるデバイスの重量に制限がある。そのため、センサをヘリコプタには搭載せず、外界センサとしてカメラを用い、ステレオ視によりヘリコプタの位置・姿勢の推定を行う研究がある。しかし、この手法では、外界カメラの視野角の範囲でしか計測を行えず、飛行範囲が限られてしまう。一方、カメラを外界ではなく内界センサとして用いる研究がある。実験空間に目標物を設置し、目標物の撮像画像上の位置や形状などにより、自己位置・姿勢を推定している。この手法では目標物を搭載カメラが撮影できる範囲でしか計測を行うことができず、より広い空間で飛行させる場合、目標物を移動させるか、目標物を複数配置し、画像からはずれないように切り替える必要がある。

本研究で開発したワイヤレスカメラでの vision feedback 制御システムは、以上のような既存の開発システムの欠点をすべて克服したシステムとなっている。

(4) 単体のカメラでヘリコプタの位置・姿勢の6自由度の情報を精度よく計測するシステムを開発した。このシステムは、Oxford University で開発された PTAM というオープンソースのシステムをコアとして、さらに本研究で独自にカスタマイズすることで汎用性とロバスト性を高めるシステム構築を行った。具体的には、

- ・PTAM は拡張現実感研究のプラットフォームとして開発されたもので、ヘリコプタに搭載してそのまま利用することはできない。本研究では、PTAM のローカルな座標系とワールド座標系の変換のための汎用的なキャリブレーション機能(図2)を追加した。
- ・機体振動やワイヤレスによる映像送信時に画像の乱れが頻繁に発生する。そのため、画像の乱れが発生(図3)すると、ヘリコプタの不安定化を招き、最悪の場合は、クラッシュを招いてしまう。これに対応するために、機体振動やワイヤレスによる映像送信時に起きる画像の乱れを補償するロバストな画像処理システム構築を行った。

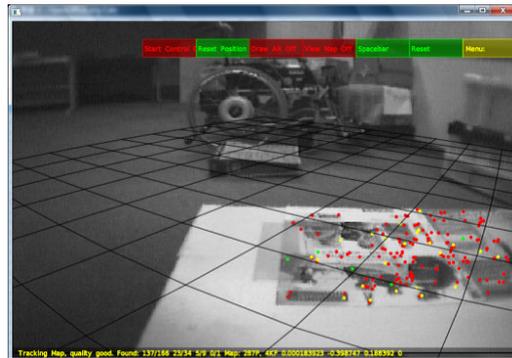


図2 キャリブレーションの画面例

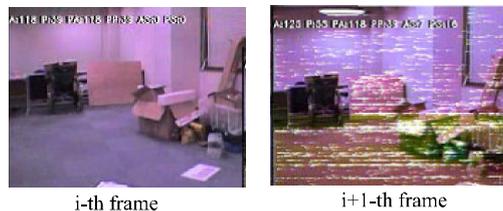


図3 画像乱れの例

(5) (4)で開発したワイヤレスカメラシステムのみを搭載し、ジャイロや加速度センサなど姿勢計測のセンサを搭載することなしに、ホバリングおよび軌道追従制御実験を行った。制御器の設計は(1),(2)で述べた Sum of Squares に基づく設計法を用いて、安定性と与えられた評価関数を最適化する制御器のフィードバックゲインを求めた。

ホバリング実験で設計した制御器の有効性を検証したのち、軌道追従実験を行った。その結果を図4、5に示す。図5は軌道追従制御実験時のコマ送りの写真である。図5の小さなウィンドはヘリコプタに搭載されたワイヤレスカメラシステムの映像である。

実験は一定の高度まで上昇したのち、その場で10秒ホバリングさせ、次の10秒間で次の目標地点まで移動、さらにその場で10秒間のホバリングを繰り返す。目標とする

X, Y 位置は A 地点(0mm, 0mm), B 地点(2000mm, 0mm), C 地点(2000mm, 1500mm), D 地点(0mm, 1500mm), A 地点(0mm, 0mm) の順番で最後に同じ地点に戻ってくるように実験を行った. Z 位置は 1000mm を維持するように制御を行った.

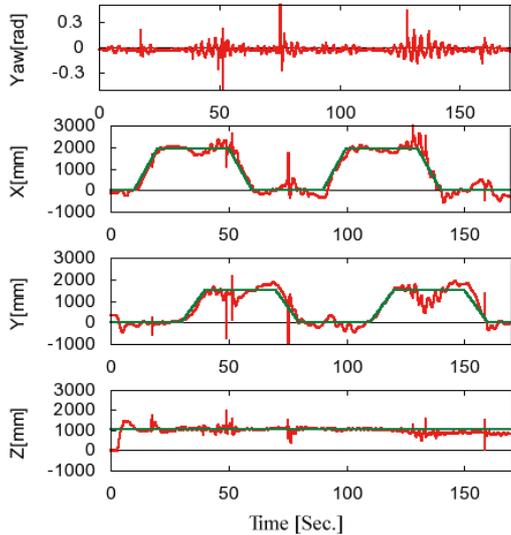


図4 軌道追従制御結果

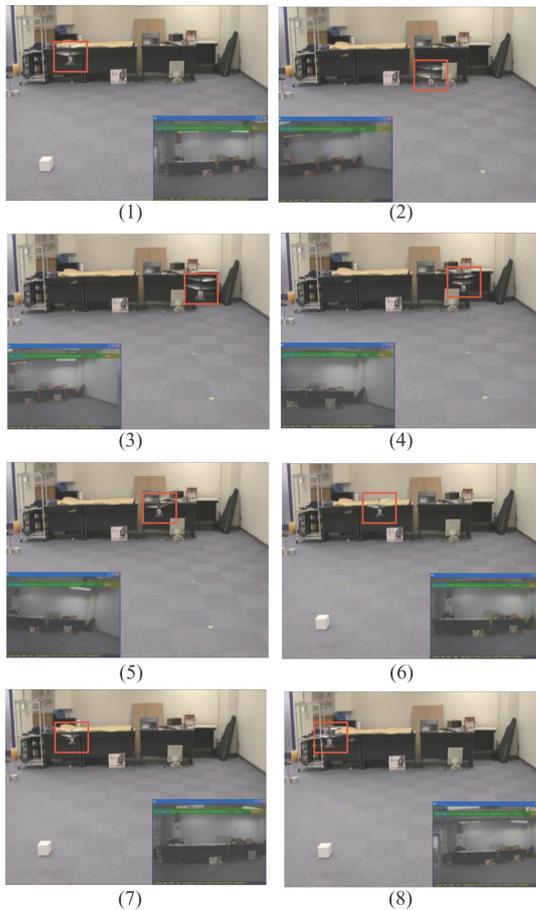


図5 軌道追従制御結果 (写真)

図4でひげ状の部分映像送信時における画像の乱れによる外乱である. このような外乱が混入しても, 設計した制御系はロバストに軌道追従制御を実現していることがわかる. 図4, 5より, 今回開発した制御システムの有効性を検証できた.

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7件)

①大竹 博, 飯村 健, 田中 一男, 同軸反転型マイクロヘリコプタの飛行安定化制御, 日本知能情報ファジィ学会誌, vol. 21, NO. 1, pp.100-106, Feb. 2009

②Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, Guaranteed Cost Control of Polynomial Fuzzy Systems via a Sum of Squares Approach, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part B, Vol. 39, No. 2, pp.561-567 April, 2009.

③Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake and Hua O. Wang, A Sum of Squares Approach to Modeling and Control of Nonlinear Dynamical Systems with Polynomial Fuzzy Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 17, No. 4, pp.911-922, August 2009.

④東 善之, 田中一男, 大竹 博, 可変迎角機構を有する飛行ロボットシミュレーションモデルの構築, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 76, No. 762, pp.361-370, Feb. 2010.

⑤Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Motoyasu Tanaka and Hua O. Wang, Wireless Vision-based Stabilization of Indoor Micro Helicopter, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Accepted.

[学会発表] (計40件)

①Ying-Jen Chen, Hiroshi Ohtake, Wen-june Wang, Kazuo Tanaka, Hua O. Wang, Guaranteed Cost Control of T-S Fuzzy

Systems Using Piecewise Lyapunov Function Based Switching Fuzzy Controller, 2009 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp.440-445, Saint Petersburg July 2009.

② Yoshiyuki Higashi, Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Improvement of Simulation Model and Development of Control Mechanism of Force Direction for a Flying Robot with Cyclogyro Wing, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Accepted, St. Louis, Oct. 11-15, 2009.

③ Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Motoshiro Wada, Hua O. Wang, Ying-Jen Chen, Polynomial Fuzzy Observer Design: A Sum of Squares Approach, 48th IEEE conference on Decision and Control, pp. 7771 - 7776, Shanghai, China, December 16-18, 2009.

④ Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Takehito Yamaguchi and Hua O. Wang, Stability Analysis of Nonlinear Systems via Multiple Mixed Max-Min based Lyapunov Functions, 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.2899-2905, July 18-23, Barcelona, 2010.

⑤ Kazuo Tanaka, Hiroshi Ohtake, Toshiaki Seo and Hua O. Wang, An SOS-based Observer Design for Polynomial Fuzzy Systems, 2011 American Control Conference, pp.4953-4958, San Francisco, Sept. 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.rc.mce.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 一男 (TANAKA KAZUO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号 : 00227125

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

大竹 博 (OHTAKE HIROSHI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号 : 60377017

Hua Wang (HUA WANG)

Boston 大学・工学部・准教授