

## 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 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360116

研究課題名（和文）秩序・階層形成による自律型エアロボットの環境適応ロバスト飛行制御

研究課題名（英文）Environmental Adaptive Flight Control for Autonomous Aero-robot  
Base on Order and Hierarchy Formation

研究代表者

中西 弘明（NAKANISHI HIROAKI）

京都大学大学院・工学研究科・講師

研究者番号：50283635

研究成果の概要（和文）：

自律型エアロボットのための高精度航法システムを開発し、それに基づくことにより環境変化を知覚することができることを明らかにした。さらに、階層を形成することにより、適応的に振る舞いを変更することができる環境適応ロバスト飛行制御系の構築方法を提案した。シミュレーション実験だけでなく自律型エアロボットの飛行実験を通じて、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We developed a precise navigation system for an autonomous aero-robot, and it is proved that environmental changes can be detected by use of the navigation system. We also proposed a method to design environmental adaptive robust flight control system based on the formation of hierarchy. The effectiveness of the proposed method was confirmed through not only numerical simulations but also flight experiments using the autonomous aero-robot.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	7,200,000	2,160,000	9,360,000

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：エアロボット，自律飛行制御，環境適応，ロバスト性，階層制御

## 1. 研究開始当初の背景

生態システムや自然界のシステムは様々な変化に対してロバストであるだけでなく、しばしばべき乗則など非常に簡単な法則からなる秩序が形成されることが知られている。しかし、秩序形成について考えると生態システムにはフラクタル構造を持つと考えられる事象は少なく、自己組織化臨界現

象などこれまでに知られている複雑系に関する研究成果によりその説明をすることは困難である。また、工学・情報システムなどへ適用する際に、自己組織化やフラクタル構造についてはシステム設計に利用できる事例は限られたものに限られていた。エアロボットの自律飛行能力は十分ではなく、環境変動に対してロバストな自律飛行

制御系の実現が強く要求されている。さらに、エアロボットのベースである産業用無人ヘリコプタにとって、突風など環境の変化に対するロバスト性の向上は運用の安全性向上の面からも要求が高い。また、信頼性の高い姿勢角推定機構は、歩行者・障害物検出に不可欠である。しかし、姿勢角推定機構に限らず、自己状態推定機構は理論から製品化まで欧米と比べて大きく遅れている分野であった。

## 2. 研究の目的

本研究では環境変動や不確かさなどを含むシステムに対して競合・協調を考慮した学習により制御系設計により形成される簡単な秩序、及び階層構造を利用して適応的に振る舞いやロバスト性を変更する適応ロバスト制御設計に関する研究を行う。その結果をエアロボット自律飛行制御への適用し、環境を知覚して適応的に振る舞いやロバスト性を形成された秩序に従って変更する飛行制御系に関する研究し、適応ロバストエアロボットへと発展させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では(1)不確かさを考慮した学習・最適化による制御系設計とそれによる秩序・階層形成、(2)高精度な自己位置同定システムとそれによる環境・状況認識システムの開発、(3)秩序形成・階層構造により適応的に振る舞いを変更する適応ロバスト制御系設計、をサブテーマとして設け、研究を実施した。最終的には、(4)環境適応型ロバスト自律飛行制御に関する研究として統合した。

サブテーマ(1)不確かさを考慮した学習・最適化による制御系設計とそれによる秩序・階層形成では、制御系設計に対して不確かさを考慮した学習・最適化を利用した。ロバストなシステム設計の指標・評価として最悪性能と平均性能を考えた。システムに最適に振舞わせようとする制御エージェントと最悪に振舞うようにする外乱エージェントの少なくとも二つの自律エージェントがシステムを介した相互フィードバック系を形成した競合ゲームとして定式化した。

サブテーマ(2)高精度な自己位置同定システムとそれによる環境・状況認識システムの開発では、高精度な自己位置同定システム、特にそのソフトウェア開発をおこなった。開発したシステムを用いて、環境・状況認識システムへと発展させた。

サブテーマ(3)秩序形成・階層構造により適応的に振る舞いを変更する適応ロバスト制御系設計では、サブテーマ(1)の制御系

における秩序形成パラメータをサブテーマ(2)により環境・状況認識した結果に基づいて変更することにより適応的にロバスト性を変更できる適応ロバスト制御系を構築した。

サブテーマ(4)環境適応型ロバスト自律飛行制御に関する研究では、上記のサブテーマの成果を、エアロボット自律飛行制御へ適用し、環境を知覚し、形成された秩序に従って適応的に振る舞いやロバスト性を変更する自律飛行制御系を開発した。非線形フライトシミュレータによる数値的な検討を実施しただけでなく、飛行実験により有効性を確認した。

## 4. 研究成果

サブテーマ(1)「不確かさを考慮した学習・最適化による制御系設計とそれによる秩序・階層形成」では不確かさを考慮した学習・最適化を利用した制御系設計アルゴリズムを構築し、エアロボットのフライトシミュレータに組み込みを行った。特に、秩序形成に関して着目し、その形成メカニズムに関する検討を行った。さらに、階層制御により、水平風に対して適応的に振る舞うだけでなく、ロバスト性を向上させることが可能であることを確認した。

サブテーマ(2)「高精度な自己位置同定システムとそれによる環境・状況認識システムの開発」では、電波の往復伝搬遅延時間に基づく高精度な自己位置同定法を提案した。環境パラメータの正確な値が不可欠であったが、環境パラメータと自己位置を同時に推定する方法に拡張した。しかし、計算量が問題となることが判明したため、感度に着目することにより、推定精度を失わず、計算量を削減することができる方法を提案し、数値実験および簡易実験により確認した。また、環境に含まれる未知パラメータである磁気偏角の推定問題を、4元数を用いることにより線形問題に帰着させることが可能であることおよび $2 \times 2$ 行列の最大固有値を求める問題に帰着させることができることを示した。提案手法をエアロボットの飛行実験に適用し、地磁気偏角の推定を高精度かつ少ない計算量で実行することが可能であることを明らかにした。また、機体に搭載した気圧計による気圧観測値に地面効果による気圧上昇が現れることを明らかにした。地面効果内および外の気圧観測値の観測モデルを作成した。そのモデルを利用することにより、対地高度の推定が可能であることを示した。さらに、GPS-INSと気圧計を複合化する際に、地面効果の考慮が不可欠であること、および異なる種類のセンサからの観測情報を取り扱う非同期観測更新が不可欠であることを

示した。さらに、仮説検定に基づいて地面効果の存在を判定するループが、複合航法システムの外側に必要であることを示した。また、このように階層を有する複合航法システムの有効性を数値実験により確認し、その航法アルゴリズムとしての実装を行った。

サブテーマ(3)「秩序形成・階層構造により適応的に振る舞いを変更する適応ロバスト制御系設計」では、エアロボットのロール角とヨー角の相互作用に着目し、ヨー角制御系のアウトーループとしてロール角とその角速度をフィードバックしたときの機体の振る舞いから目標方位角を算出する適応的目標方位角生成機構を提案した。この方法により対気速度方向を推定することができ、危険な状態を自律的に避けることができることを示した。その結果として、エアロボットのロール角とヨー角の相互作用に着目し、ヨー角制御系のアウトーループとしてロール角とその角速度をフィードバックしたときの機体の振る舞いから目標方位角を算出する適応的目標方位角生成機構により、水平風に対するロバスト性を大幅に向上可能であることを確認した。

サブテーマ(4)「環境適応型ロバスト自律飛行制御に関する研究」では、他のサブテーマの成果に基づいて構築した環境適応型飛行制御による飛行実験を行うことにより、機体の旋回方法が風の強さと機体対地速度に応じて変化することを確認した。さらに、飛行状況に応じて自然旋回、Tail-in-Circle、Tail-in-CircleとNose-in-Circle複合旋回の3パターンが出現することを明らかにし、飛行状況に応じて自律・適応的に旋回方法を選択することができることを示した。また、提案した制御系を利用して旋回を行うことにより、目標速度、目標軌道方位角速度だけでなく、環境、特に水平風の風速に応じて、旋回方法を自律的に変化させるだけでなく、ロバスト性の高い旋回方法を自律的に選択できることを明らかにした。

#### 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3件)

- ① Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi, Improved Stability using Environmental Adaptive Yaw Control for Autonomous Unmanned Helicopter and Bifurcation of Maneuvering in Turning, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6, pp.

1091-1099, 2011

- ② 金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫: 往復伝搬時間測定による小天体の自転運動およびローバ位置の推定法. 計測自動制御学会論文集, 第46巻5号, pp. 296-305, 2010
- ③ 中西弘明, 金田さやか, 榎木哲夫, 堀口由貴男: 自律型無人ヘリコプタの環境適応方位制御, 計測自動制御学会論文集, 第46巻1号, pp. 8-15, 2010

[学会発表] (計26件)

- ① Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi, Measurement Model of Barometer in Ground Effect of Unmanned Helicopter and Its Application to Estimate Terrain Clearance, Proceedings of 9th IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, pp. 232-237, 2011
- ② 中西弘明, 無人ヘリコプタの自律飛行制御, 日本航空宇宙学会・関西支部主催 第432回航空懇談会(特別講演), 2011
- ③ Hiroaki Nakanishi, Environmental Adaptive Yaw Control for Autonomous Unmanned Helicopter and Bifurcation of Maneuvering in Turning, Japan-Tag in Heidelberg(招待講演), 2011
- ④ 中西弘明, 無人ヘリコプタの自律飛行制御とその応用, 第8回知能ロボットの最前線 - 空を飛ぶロボティクス -, 大阪電気通信大学メカトロニクス基礎研究施設特別講演, 2011年
- ⑤ 中西弘明, 自律型無人ヘリコプタの開発とその防災・災害対応活動に関する研究, 第6回競基弘授賞記念講演会(受賞特別講演), 2011
- ⑥ 中西弘明, 自律型エアロボットの開発とその防災活動への応用, 平成23年度京機会関西支部第二世紀記念事業会(特別講演), 2011
- ⑦ Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata and Tetsuo Sawaragi: Environmental Adaptive Yaw Control for Autonomous Unmanned Helicopter and Bifurcation of Maneuvering in Turning, World Automation Congress 2010(WAC2010 in Kobe), ISIAC 489, 2010
- ⑧ Sayaka Kanata, Hiroaki Nakanishi and Tetsuo Sawaragi, Experimental Studies of Localization Method using Round-Trip Range Measurements, World Automation Congress

2010(WAC2010 in Kobe), ISAC 266, 2010

- ⑨ Hiroaki Nakanishi, Sayaka Kanata, Tetsuo Sawaragim and Yukio Horiguchi, Estimation of Magnetic Declination Angle using Reduced QUEST for an Unmanned Aerial Vehicle, Proc. of IEEE-Internainal Conference on Industrial Technology), pp. 1308-1312, 2010

[図書] (計 2 件)

- ① 中西弘明, ロボットテクノロジー: 一般社団法人 日本ロボット学会 編 (第 2 編 5 章「無人飛行体」担当), オーム社, 2011
- ② Satoshi Tadokoro, Masahiro Onosato, Hiroaki Nakanishi, Kenzo Nonami, Kuniaki Kawabata, Yasushi Hada, Hajime Asama, Fumiaki Takemura, Kiyoshi Maeda, Kenjiro Miura and Atsushi Yamashita, Rescue Robotics -DDT Project on Robots and Systems for Urban Search and Rescue-, Springer London, 2009

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/ja/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中西 弘明 (NAKANISHI HIROAKI)  
京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 50283635

### (2) 研究分担者

金田 さやか (KANATA SAYAKA)  
大阪府立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60605567

### (3) 連携研究者

なし