

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18560244

研究課題名 (和文) 多形態変化ロボットのシステム表現と制御法の開発

研究課題名 (英文) System Representation and Control for Multi-Structural Robots

研究代表者

田中 一男 (TANAKA KAZUO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：00227125

研究成果の概要：近年、形状が多様に変化するロボットが開発されており、将来的にはそのニーズは益々高まるものと予想される。本研究では、形状などを運動中に巧みに変化させることで、効率よく飛行力（上昇力など）を得る空中移動ロボットの開発を行った。また、この空中移動ロボットの形状が運動中に変化することを考慮した上で、ダイナミクスシステム表現を導き、そのダイナミクスを包括するシステムの制御法の開発にも成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,700,000	0	1,700,000
2007 年度	500,000	150,000	650,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	330,000	3,130,000

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：飛行ロボット、形状変化、非線形制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 移動ロボット分野では、これまでほとんど陸上（あるいは、数は少ないが、水中）を移動するロボットが開発されてきた。

(2) 空中を移動するロボットとしては、従来型の飛行機やヘリコプタの飛行原理を利用したものが主に開発されてきた。

(3) これまでの機械制御は、主に形状不変の機械系に対する制御を扱ってきたが、機械に複雑な動きや高度な動きを要求する場合、形

状を可変にする必要が生じる。

(4) 現在でも、形状変化を伴うロボット開発が行われているが、その形状変化は比較的ゆっくりと行われており、システム全体のダイナミクスに直接影響を及ぼさないステティックな変化を扱っている。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、空中移動ロボットを開発する。陸上を移動するロボットはその場で停止

しても全く問題は生じないが、空中移動ロボットは停止してしまうと、そのまま落下、破損してしまうことから、また、飛行制御自身も難しい問題であることから、飛行ロボット研究は非常にチャレンジなテーマである。

(2)本研究では、従来の飛行機やヘリコプタの飛行原理とは全く異なる原理で飛行力を得るロボットを開発する。

(3)本研究では、形状変化を伴うシステム制御法を開発する。

(4)本研究では、ダイナミックな形状変化を伴うシステムにも適用可能な制御法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1)空中移動ロボットの開発として、ロータ部の開発をメインテーマとする。ロータ機構部を設計したのち、シミュレーションと実験を通して飛行特性を把握し、それに基づいたロータ機構部の改善を行う。

(2)従来の飛行機やヘリコプタの飛行原理とは全く異なる原理で飛行力を得る機構として、サイクロジャイロ翼を有する新たな機構を開発する。

(3)形状変化を記述するシステムの安定性をリアプノフ安定論に基づくアプローチで議論する。

(4)ダイナミックな形状変化を伴うシステムの安定化補償器の設計条件を導出する。

### 4. 研究成果

(1)空中移動ロボットの開発として、図1に示すような伸縮可能なパンタグラフ式可変翼構造をもつユニットを組み合わせたロータを開発した。このロータは回転中にその形状が変化し、しかも、ユニットに取り付けられている翼が揺動（すなわち、翼の迎角が変化）することが特徴である。

このロータのシミュレーションモデルを構築し、ユニット数、翼枚数、翼面積、リンク長などの形状パラメータをシミュレーションを通して最適化し、その最適パラメータに基づき、図2のような実機を作成した。

図3に示すような飛行性能の実験システムを構築し、飛行性能実験を行った結果を図4に示す。図4ではシミュレーションの結果も合わせて示している。図4の結果からわか

るように、構築したシミュレーションモデルと飛行性能実験の結果は非常に良く一致しており、シミュレーションモデルの精度が高いことがわかる。

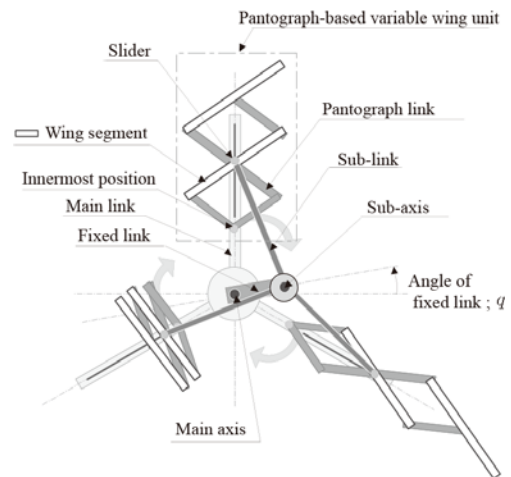


図1 開発したロータ概略図（3ユニット）

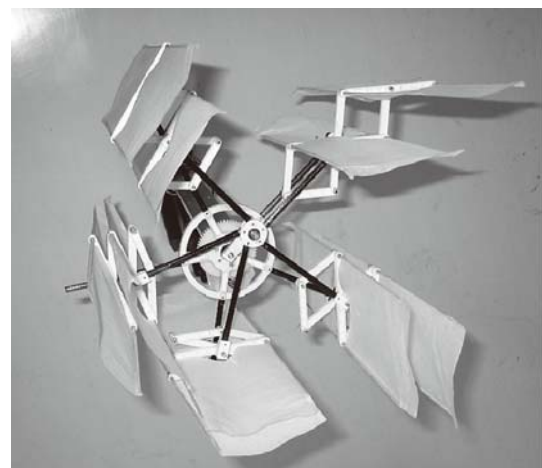


図2 開発したロータ部（5ユニット）

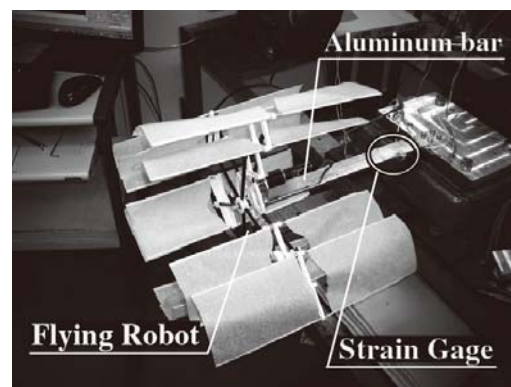
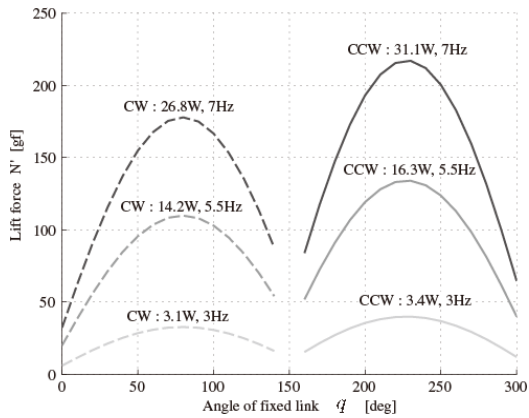
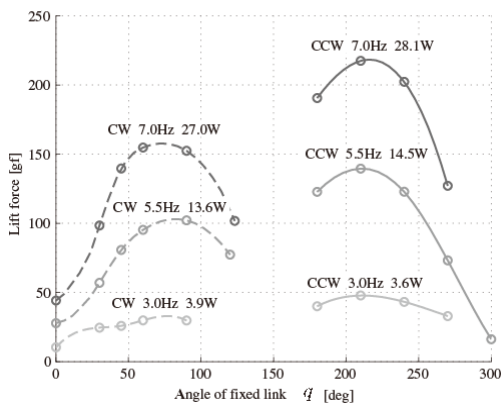


図3 飛行性能実験システム



(1)シミュレーション結果



(2)実験結果

図4 飛行性能シミュレーション/実験結果

(2)今回開発したロータは従来にない全く新たなサイクロジャイロ翼であり、従来の飛行機やヘリコプタの飛行原理とは全く異なる原理で飛行力を得る機構を有していることが特徴である。とくに、図1や図2からわかるとおり、今回開発したロータ部は回転中にパンタグラフ部が伸縮するため、その飛行原理は極めてユニークである。

図5には、開発したロータの飛行原理が示されている。振り下ろし側では、回転中のロータのリンクは最大に伸び、そのときの翼は水平になるように、すなわち、迎角が90度になるように設計されており、振り下ろしの翼の速度が最大、しかも、翼にかかる抗力が100%上昇力に寄与している。逆に、振り上げ側では、ロータのリンクは最大に縮み、そのときの翼は垂直になるように、すなわち、迎角がゼロになるように設計されており、下降力に寄与する抗力が発生することはない。また、最下部付近と最上部付近では翼の迎角は上昇力を得るような角度になるように設計されている。このように、今回開発されたロ

ータは効率の良い飛行が実現できるような機構を有している。

また、この機構では図1の sub-axis の位置を変更することで、飛行力ベクトルの向きを自由に換えられることが特徴である。この特徴を利用すると、ヘリコプタでは実現できない飛行操縦性を実現できる。ヘリコプタでは、前進(後進)の場合、機首を下げる(上げる)必要があり、飛行の方向によって飛行姿勢は限定されてしまう。一方、本飛行ロボットでは、任意の飛行姿勢で任意の方向に飛行できる飛行操縦性が最大の特長となる。よって、この飛行操縦性を活かし、災害救助や情報収集などの極めて高度な飛行タスクが要求される状況において、ヘリコプタ型ロボットよりも優れた性能を発揮できる。

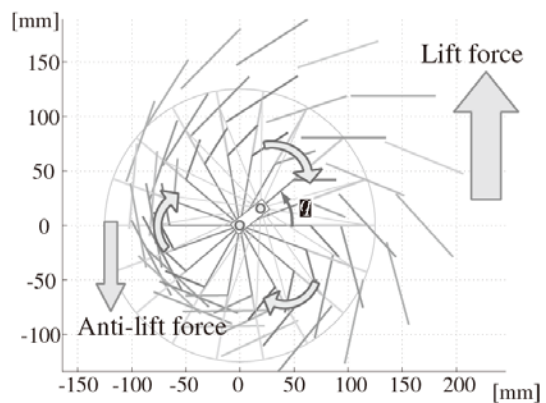


図5 開発したロータの飛行原理

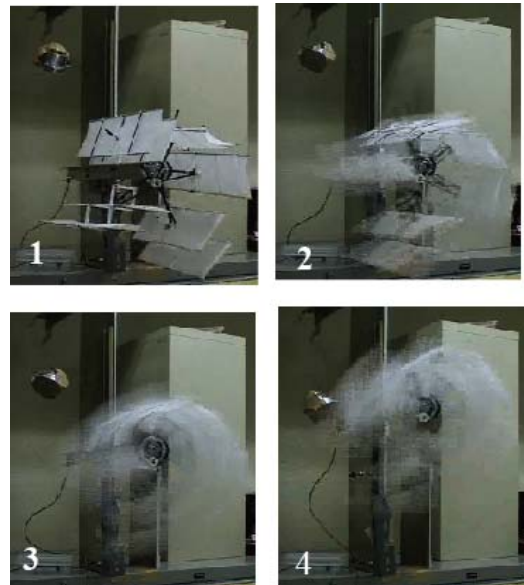


図6 ロータの上昇実験の様子

図6はロータの上昇実験結果の様子を示したものであり、ロータ自身の自重以外に

155g のペーロードマージンをもつ上昇力を発生できることが確認され、我々の開発した一世代前のロータ（このロータはペーロードマージンがほとんどゼロであった）に比べて、著しく飛行性能を改善できた。

図7はロータを4台組み合わせたフルモデルの飛行機体の写真である。ロータ単体では反トルクが発生し、実際の飛行ロボットとしては機能しない。この反トルクを相殺し、上昇力成分だけを取り出すために、図7のような飛行機体を作成した。上昇力計測装置でこのフルモデルの上昇力を測定した結果、バッテリーやセンサ類を搭載しても十分なペーロードを確保できることを確認した。

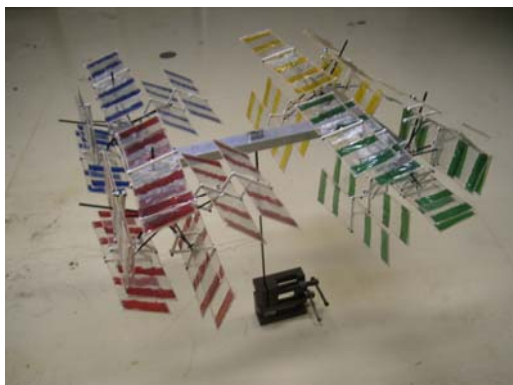


図7 開発したフルモデル飛行機体

(3)形状変化を記述するシステムのクラスを定義し、このクラスに含まれる非線形システムに対する安定性をリアプノフ安定論に基づくアプローチで解析する方法論を提案した。詳細は主な発表論文にリストアップされている論文を参照されたい。

(4)前述の(3)の成果に基づいて、ダイナミックな形状変化を伴うシステムの安定化補償器の設計条件を導出した。これらの条件は線形行列不等式で記述されているため、数値的に解ける可解問題として定式化されている。詳細は主な発表論文にリストアップされている論文を参照されたい。この設計条件を飛行ロボットへ適用し、シミュレーションを行った。今後は実機に適用し、図7のフルモデルで3次元空間上の飛行実験を行う予定である。

## 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48件)

①K. Tanaka, K. Yamauchi, H. Ohtake, H. Wang, Sensor Reduction for Backing-UP Control of a Vehicle with Triple Trailers, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 2, pp. 497-509 Feb. 2009, 査読有

②N. Hara, K. Tanaka, H. Ohtake, H. Wang, Development of a Flying Robot with Pantograph-based Variable Wing Mechanism, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 25, No. 1, pp. 79-87 Feb. 2009, 査読有

③ K. Tanaka, R. Suzuki, T. Emaru, Y. Higashi, H. Wang, Development of a Cyclogyro-Based Flying Robot with Variable Attack Angle Mechanisms, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 5, pp. 565-570, Oct. 2007, 査読有.

④ K. Tanaka, H. Ohtak, H. Wang, A Descriptor System Approach to Fuzzy Control System Design via Fuzzy Lyapunov Functions, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 333-341, June 2007, 査読有

⑤H. Ohtake, K. Tanaka, H. Wang, Switching Fuzzy Controller Design based on Switching Lyapunov Function for a Class of Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Vol. 36, No. 1, pp. 13-23, Feb., 2006, 査読有

〔学会発表〕(計33件)

①小松 嵩宙, 和田 基宏, 大竹 博, 田中 一男, マイクロヘリコプタの飛行制御 - LMIアプローチ vs SOSアプローチ -, 第24回ファジィシステムシンポジウム, pp. 983-988, 大阪, 2008年9月5日

②長谷川信, 田中一男, 大竹博, 位相差を有するマルチ平行リンク機構の開発と飛行ロボットへの適用, ROBOMEC 2007, 2A2-B01 in CD, 秋田 2007年5月12日

③原 直裕, 田中 一男, 大竹 博, パンタグラフ式可変翼機構を用いた飛行ロボットのシミュレーションによる形状最適化, 第24回ロボット学会学術講演会, 岡山, 3A22 in CD, 2006年9月15日

〔図書〕(計2件)

①K. Tanaka (Coauthor), Integration of fuzzy logic and chaos theory (Ed. Z. Li, W. A. Halang and G. Chen), Springer, 2006.

②田中一男 (共著), 機械工学便覧 デザイン偏  $\beta$ 6-制御システム- (日本機械学会編), 丸善 (株), 2006

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

①名称：回転翼  
発明者：田中一男、東 善之、原 直裕、長谷川 信  
権利者：国立大学法人 電気通信大学  
種類：特許  
番号：特願 2007-039541  
出願年月日：2007 年 2 月 20 日  
国内外の別：国内

②名称：平行リンク機構を有する回転動力伝達装置  
発明者：田中一男、長谷川 信  
権利者：国立大学法人 電気通信大学  
種類：特許  
番号：特願 2007-35406  
出願年月日：2007 年 2 月 15 日  
国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 一男 (TANAKA KAZUO)  
電気通信大学・電気通信学部・教授  
研究者番号：00227125

### (2) 研究分担者

大竹 博 (OHTAKE HIROSHI)  
電気通信大学・電気通信学部・助教  
研究者番号：60377017

### (3) 連携研究者

Hua Wang (HUA WANG)  
Boston 大学・工学部・准教授