

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450381

研究課題名(和文)低コスト画像リモートセンシング無人航空機のための軽量ミラージンバル装置の開発

研究課題名(英文)Development of lightweight mirror gimbal system for low-cost image based remote sensing UAV

研究代表者

佐藤 淳 (Satoh, Atsushi)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：60324969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年低コストなリモートセンシング手段として、無人航空機(UAV)が注目されている。観測用カメラは、機体の姿勢変化の影響を除くためにジンバル機構で支持されることが通常である。しかしジンバルは重く、小型軽量で低コストというUAVの利点を相殺する。そこで本研究では、機体に固定されたカメラに対し、ミラー光学系だけをジンバルで支持するシステムを新たに提案する。ミラーは軽量のため広帯域の制御が可能となり、本構成は姿勢変化だけでなく構造振動の抑制にも有効であると考えられる。本研究では小型UAVに搭載可能な小型軽量の撮影システムを開発し、ジンバルの逆運動学的関係を導出し、撮影実験により有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Recently, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely known as a low-cost remote sensing platform. The sensing camera is usually supported by a gimbal mechanism to attenuate the camera attitude change by aircraft motion. However, the gimbal is heavy enough to cancel the cost and size merit of UAVs. Therefore, a new photographic system consists of the aircraft body-fixed camera and gimballed photographic mirror was proposed in this project. The control bandwidth of the gimballed mirror is higher than conventional camera gimbal because of less moment of inertia. This suggests the new system will be effective in attenuating the structural oscillation. A small and lightweight photographic system for small UAVs has been developed. Inverse kinematics of the gimbal was derived and the effectiveness of the new system was verified by shooting test.

研究分野：制御工学, 航空宇宙工学

キーワード：農業ロボティクス リモートセンシング 無人航空機 自動制御

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星や航空機に搭載したカメラ等を用いて地表からの各種波長の電磁波を計測する、リモートセンシング(遠隔計測)技術の農業分野への応用が近年盛んに行われており、施肥管理や生育診断などをはじめとして広範な活用が期待されている。例えば米の食味と相関する米粒タンパク質含有量の推定(安積・志賀, 2003)や、イネいもち病の被害度の評価(Kobayashi ら 2001, Kobayashi ら 2003, 小林ら 2005)が可能であることが実証されている。しかし上記の研究で用いられた人工衛星または有人飛行機によるセンシングは高価(衛星で1枚150~250万円)で小規模農家ではコスト的に受け入れられないことのほか、雲による妨害を避けにくいことや観測後すぐにデータが入手できないため営農指導に活用しづらいなどの問題点があり実用には至っていない。そのため研究代表者の佐藤は科学研究費(基盤研究(C) 22580295)の助成を受け、(独)農研機構・東北農業研究センターの小林隆主任研究員(当時)と共同で、H22~24年度に農業リモートセンシング用小型 UAV GAV-3 の開発を行った。



図1: リモートセンシング用無人機 GAV-3

本機は機体直下に向けて胴体に固定されたデジタルカメラ型マルチスペクトルセンサを搭載し、NDVI 計測のための画像データを地上解像度 10cm 程度で取得可能である。機体は小型軽量で(全長 1.3m, 全幅 1.8m, 全備重量 1.5kg)手投げにより滑走路なしに離陸可能である。また指定した高度および水平姿勢を保持する自動制御が行われるため、操縦者は

水平面内のコース指示のみを行い、飛行経路直下を連続的に撮影可能である。センサを除く機体コストは 30 万円程度である。

GAV-3 で得られる画像1コマはおよそ 100m 四方であるため、基本的には複数画像をモザイク合成することで調査領域をカバーする必要がある。東北農研の協力を得て H24 年度に撮影実験を行った結果以下の知見が得られた。

- (1) 地上平均風速 2m/s 以下の環境では直線飛行しての撮影は容易。それ以上の風速では姿勢安定化制御を行っても姿勢の変化が大きく、飛行地点の直下を確実に撮影することは難しい。また撮影方向(機体姿勢)の変化が大きいため連続的に撮影した画像の合成も難しくなる。
- (2) ヘリ等と異なり、プロペラの回転振動は小さくブレの原因にはならないという利点がある。しかし旋回時に機体を傾斜(ロール)させる必要があることと、旋回終了直後は揺動(ダッチロールモード)が発生しがちなため、直下の撮影が行えない時間が飛行時間中に少なからず存在する。

風速 2m/s 以下という状況は実験期間中早朝、夕方の時間帯で週に1~2日程度存在した。しかし NDVI 計測のためには日照が強い昼間のデータが得られることがより望ましい。GAV-3 は手投げにより離陸する機体としては大型の部類に入るが、姿勢制御により日中の風が強い時間帯でも姿勢変化が撮影に影響を及ぼさない程度に抑圧することは、有人機との機体規模の違いを考慮すれば相当困難であると考えられる(佐藤昌之ら 2006)。

また航空機は機体を傾けて旋回する必要があるため、撮影の妨げとなる。そのためジンバル機構を搭載しカメラの水平を保つことが一般的に行われるが、小型 UAV にとって相当な重量増加となる。

## 2. 研究の目的

以上の知見より、本研究では圃場へ直接離着陸可能な小型 UAV にも搭載可能な小型で軽量のジンバルシステムを開発することを目的とする。これは機体へ固定したカメラへのミラー光学系のみを姿勢安定化するもので (図 2 参照)、以下のような利点がある。

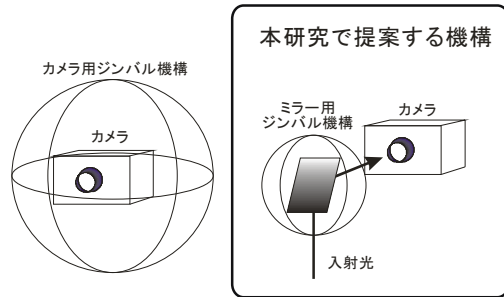


図 2 : 提案するミラージンバル機構

る。

- ミラー光学系はカメラ本体より軽量のため、小型 UAV にも搭載可能な軽量ジンバルシステムが可能となる。また高帯域な制御が可能となる。
- ジンバルシステムの高帯域化により、機体姿勢の変化に追従することに加え、従来のジンバルでは困難な機体の構造振動 (変形) やロータシステム等の振動の影響まで抑圧できる可能性がある。
- カメラシステムの配置に自由度が生まれ、許容できる重心位置や機器サイズの制約が厳しい小型 UAV への搭載が容易になる。

## 3. 研究の方法

### (1) ミラー光学系ジンバルシステムの開発

#### 第 1 段階

##### ① ミラージンバル機構の検討

ジンバル機構としては、広く用いられているシリアルリンク機構と、産業用ロボットなどの分野で用いられているパラレルリンク機構の 2 種が代表的である。

小型 UAV への搭載を目標とする観点からは、機構の重量はなるべく軽量化したい。また画像リモートセンシングへの応用を考えたとき、撮影方向はほぼ機体直下に限られ、ジンバルの動作範囲は  $\pm 15$  度程度あれば十分である。これらの条件の下、3D CAD を用いて機構を試作し、その解析機能を利用して重量及びミラー動作範囲の調査を行う。

##### ② 使用するアクチュエータの選定

超音波モータ、ボイスコイルモータ、DC ブラシレスモータ、DC コアレスモータ、RC 用サーボモータ等について検討を行った。モータ出力の他減速機、センサ、ドライバ回路を含めた大きさと重量を比較し検討を行う。

##### ③ 動作検証用制御システムの開発

試作機構の動作検証を行うために、与えられたジンバル姿勢角を実現するために必要なモータ回転角を計算し、ミラーを駆動するためのハードウェア及びソフトウェアの開発を行う。

## 第 2 段階

##### ① 試作ジンバルシステムの改良

第 1 段階で開発した試作システムの問題点を明らかにし、改良を行う。

第 1 段階のシステムでは、飛行中の撮影でジンバルに必要とされる自由度が 2 であるのに対し、ミラーの姿勢自由度は 3 であった。そのため運動学的関係の導出が難しく、改善が必要であると考えられた。また RC サーボモータには回転角情報の出力機能が無いため、目標回転角が得られているかの確認が困難であった。

##### ② 運動学的関係の導出

目標とするミラー姿勢角を実現するために必要なモータ回転角を計算するために、両者の関係である逆運動学を導出する。

③ パラメータ感度解析

ミラーはリンク機構により駆動されるが、各リンクの長さなどの機構パラメータの変動がミラー姿勢角へ与える影響の程度を見積もり、高い工作精度を要求される部分を明らかにする。

④ 撮影用アルゴリズムの導出

地上のターゲットを撮影するための適切なミラー姿勢角を決定するためのアルゴリズムを開発する。

### 第3段階

#### フライトモデルの開発

第2段階までの知見に基づき、小型無人飛行機に搭載可能な重量、体積、形状を持つ撮影装置を開発する。カメラ結合時の目標寸法は直径 100mm、長さ 200mm、重量 100g とする。またミラー可動範囲の目標は±15度とする。

(2) 画像観測用小型無人飛行機の開発

GAV-3 からの知見に基づく機体構成の改良、推進系および操舵系、飛行制御系を除いたペイロード 1kg を搭載可能な無人機の基本設計。機体および搭載機器の開発。基本的飛行性能を確認するための飛行実験の実施。

#### 4. 研究成果

3章で述べた研究計画に従い、ミラージンバル機構およびその制御に必要な機構関係の導出と撮影のためのミラー指向アルゴリズムの開発、小型無人機に搭載可能なフライトモデルの開発、撮影装置搭載用小型無人機の開発を行った。

(1) ミラー光学系ジンバルシステム

開発の第1段階として、平成25年度には数種類の機構モデルを3D CADにより試作した。重量及びミラー可動範囲を機構解析機能により調査し、必要な条件を満たしつつ軽量でサイズの小さいパラレルリンク機構を採用することを決定した。

アクチュエータには各種サーボモータを比較検討した結果、軽量化を優先してRCサーボモータを利用することに決定した。

また試作リンク機構の動作検証用に mbed マイコン及び PC を用いてジンバル制御用システムを開発した。

開発の第2段階として、平成26年度には支持機構の改良及び、モデリング、構造の感度解析を行った。

平成25年度に試作した機構では、ミラー運動の自由度は3であり、飛行中の機体運動に追従したミラー姿勢変化を発生するためには冗長な自由度を持っていたためサーボモータ回転角とミラー姿勢角の間の運動学的関係を導出することが難しかった。そこでミラー支持機構に機械的拘束を追加するとともに、二つのサーボモータ回転軸が直交するように配置を変更することで機構関係の単純化を行った。その結果冗長な自由度がなくなり適切な運動学的関係の導出が容易になった。

さらにカメラと撮影点の位置関係にもとづき適切なミラーステージ姿勢角を算出するアルゴリズムを決定し、実験により有効性を確認した。

加えて姿勢角の指定実験およびリンク長等のパラメータ感度の解析を行い、ミラー姿勢角誤差は平均1度程度を達成していることを確認した。

開発の第3段階として、平成27年度には小型無人機に搭載可能な目標寸法および重量を設定し、フライト可能なジンバル装置の開発を行った。その諸元を表1に示す。

サイズ[mm]	φ105×160 (187)
重量[g]	124.3 (243.3)
ジンバル駆動モータ	Futaba RS304MD×2
カメラ	SONY DSC-QX10
カメラ操作モータ	Futaba S3154×2

注:括弧内はカメラ結合時

表1 フライトモデル諸元

第2段階モデルは主にアルミ合金製で約360gの重量があったが、フライトモデルはCFRP、ベニヤ材などを用いることで約

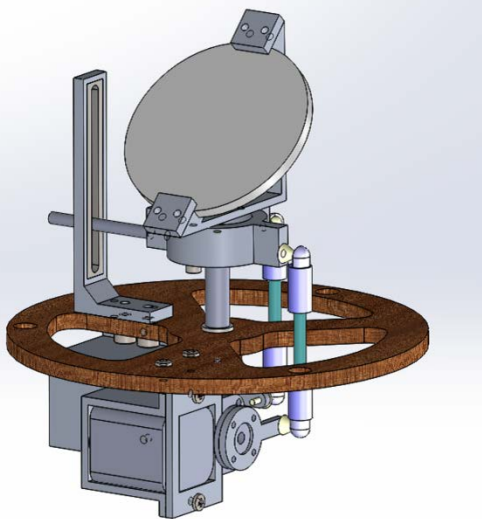


図3 フライトモデル (ミラー支持部)

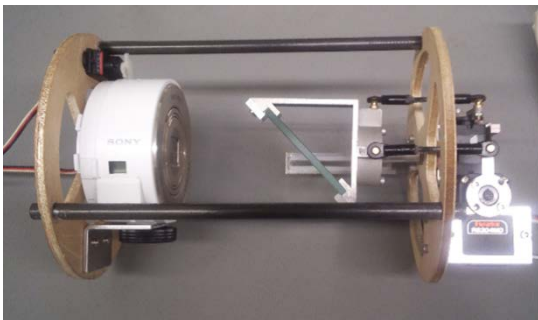


図4 フライトモデル (カメラ結合後)

124.3gにまで軽量化された(図3, 4)。またミラー可動範囲はピッチ, ロール方向

ともに15度以上を確保し, 機体の姿勢安定化制御と組み合わせることで飛行時間の大部分において機体直下を撮影可能な目処があった。

ミラー系の逆運動学に関してはフレーム及びミラー座標系を図5, 6のようにとり, ミラーステージが所望の姿勢角(オイラー角) $(\alpha, \beta, 0)$ をとるための各軸サーボ回転角を導出した。

$$\theta_i = \sin^{-1} \left( \frac{d_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{b_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \right)$$

$i = 1, 2$

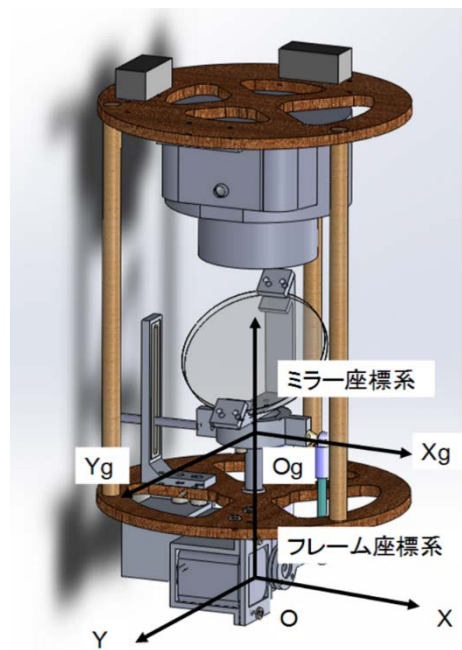


図5 座標

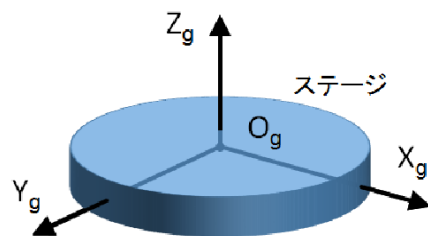


図6 ミラー軸

$$a_1 = 2h(lsac\beta + m), b_1 = 2h(lsas\beta + h),$$

$$d_1 = l^2 + f^2 + m^2 + 2h^2 - n^2 + 2l(hsas\beta + msac\beta - fca),$$

$$a_2 = 2h(ls\beta + m), b_2 = 2h^2,$$

$$d_2 = l^2 + f^2 + m^2 + 2h^2 - n^2$$

$$+ 2l(ms\beta - fc\beta)$$

またミラー位置決め精度向上のため、回転角が計測可能なシリアルサーボモータを採用し、駆動回路を開発した。様々なミラー姿勢角参照値に対するモータ回転角及びミラー姿勢角の誤差を表2に示す。

	平均	最大
$ \alpha_r - \alpha $	0.23	0.80
$ \beta_r - \beta $	0.46	1.00
$ \theta_{r1} - \theta_1 $	0.33	0.50
$ \theta_{r2} - \theta_2 $	0.20	0.40

表2 回転角誤差 [deg]

ミラー姿勢角誤差は0.5度以下を達成した。これは撮影方向の誤差としては1度以下であることを意味する。またミラー動作範囲を実機にて検証した結果、ピッチ、ヨーともに±15度以上であり、設計目標を達成した。

## (2) 画像観測用小型無人飛行機の開発

当初の研究計画通り、平成26年度からGAV-5無人機の開発を行った。

推進系および操舵系、飛行制御系を除いたペイロード1kgを搭載可能な無人機の基本設計を行い、機体および搭載機器の開発を行った。胴体および主翼は発泡材およびCFRPを用いて作成した。完成した機体にラジコン用機器および仮想ペイロードとしてのバラストを搭載し、基本的飛行性能を確認するための飛行実験を実施した。

実験の結果、操舵応答はピッチおよびヨーについては問題がなかった。ロールに関しては主翼の剛性が低いため、エルロン入力が過大にならぬよう配慮することが必要であった。推力に関しては離陸および巡航高度への上昇性能に関しては問題がなかったが、推力変化に伴うピッチアップ傾向が顕

著で改善を要した。

このピッチアップ傾向は推力線と重心の位置関係が原因と考えられ、平成27年度には推力線を変更した新型胴体の設計を完了した。また搭載する飛行制御システム及びセンサシステムの開発を行った。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① Atsushi Satoh, Design of Full State Jump Reset Observer with General Reset Condition and Jump Dynamics, 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference 2015, 2015.7.28-30, 中華人民共和国 杭州市
- ② Atsushi Satoh, Synthesis of Output Feedback Linear Reset Control Based on Common Quadratic Lyapunov-like Function, 14th European Control Conference, 2015.7.14-17, オーストラリア国 リンツ市
- ③ 佐藤 淳, 成澤 翔, 佐藤昌之, 村岡浩治, ハイブリッド制御によるQuad tilt wing VTOL機のS/CAS設計と遷移飛行実験, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2015.3.4-7, 東京電機大学 (東京都)
- ④ 成澤 翔, 佐藤 淳, 佐藤昌之, 村岡浩治, リセット制御にもとづく飛行制御系の設計-JAXA QTW UAVのS/CAS設計への適用-, 第57回自動制御連合講演会, 2014.11.10-12, 伊香保ホテル天坊 (群馬県)
- ⑤ 佐藤 淳, 成澤 翔, 佐藤昌之, 村岡浩治, QTWの飛行制御則設計と飛行試験-リセット制御器を用いたハイブリッド制御の構成-, 日本航空宇宙学会第52回飛行機シンポジウム, 2014.10.8-10, 長崎ブリックホール (長崎県)
- ⑥ 成澤 翔, 佐藤 淳, リセット制御系の飛行制御系への応用, 計測自動制御学会東北支部第288回研究集会, 2014.5.19, 岩手大学 (岩手県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 淳 (SATOH ATSUSHI)  
岩手大学・工学部・准教授  
研究者番号: 60324969

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし