

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25年 6月 14日現在

機関番号：11201
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010 ～ 2012
 課題番号：22580295
 研究課題名（和文） 低コストマルチスペクトル画像リモートセンシング用小型無人機の開発と評価
 研究課題名（英文） Development and evaluation of a small UAV for low-cost multi-spectral image sensing
 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

研究成果の概要（和文）：本研究では農業リモートセンシング用マルチスペクトル画像を低コストで取得可能な小型無人航空機を開発し、実環境における観測テストを行った。開発した機体 GAV-3 は全備重量約 1.6kg の固定翼機で、手投げ発進して不整地への着陸回収が可能である。計測ミッションでは観測高度 100m まで上昇し、滞空して画像撮影を行う。水平飛行中の機体姿勢および高度は自動制御により一定に保たれ、地上操縦者は水平面内のコースを指定するだけで観測を行う事が可能である。

研究成果の概要（英文）：In this project, a small unmanned aerial vehicle (UAV) GAV-3 has developed to take agricultural multi-spectral sensing images with lower-cost than manned aircrafts and sensing satellites. A test flight for remote sensing in the real environment was also accomplished. The all-up weight of GAV-3 is approximately 1.6 kilogram and it is recovered by belly landing after hand launch. The mission profile is 100 meter climb and loitering for taking sensing images. Automatic control for attitude leveling and altitude holding has been implemented. A ground operator only indicates the horizontal flight course for survey to the UAV.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：農業ロボティクス，精密農業，UAV・MAV

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する

広範な活用が期待されている。特に複数の波長（赤，緑，近赤外線）で農作物を撮影したマルチスペクトル画像から得られる情報は有用で、米の食味と関連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（研究分担者業績：

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。しかしこれらの成果の実用化に際しては、現在の計測手段(人工衛星または有人飛行機)に起因する次のような困難がある。

- (1) 東北地方の6~8月はやませ(湿った東風)の影響で曇天が多いが、衛星は撮影日時を指定できないため雲を避けることは困難。有人機は短時間の晴れ間を利用した撮影が可能だが、空港待機費用が高額。
- (2) 高解像度の画像データ(航空機:1m程度, IKONOS衛星:4m程度)は高価(150~250万円)であり、小規模農家ではコスト的に受け入れられない。また衛星画像は観測後すぐに入手できないため、解析結果を実際の営農指導等に活用できない。

そのため上記の困難を克服し、農業リモートセンシングの実用化を目指すためには、衛星や有人機と比べ、コストや運用・情報の即時性などに優れた、新しい計測手段が必要である。このような特徴を持つ新しい計測手段として、近年発展が著しい無人航空機がある。これは自律的に飛行するロボットの航空機であり、小型無人のため低コストで即時的な運用が可能である。近年では地磁気分布(“Anti-plane” 船木ら, 科研費課題番号17204038, 2005-8)や海水温(“Aerosonde” Curry et al., 2004)のリモートセンシングなどに用いられ、今後さらに様々な計測への活用が期待されている。

しかし小型軽量の無人機は突風による姿勢変化が大きいため、目標を確実に撮影するためには風による姿勢変化を抑制するための自動制御系が不可欠である。これまでに姿勢制御系を搭載した無人飛行機はあるが(得竹, 2008)、本研究のように明確な目的(画像計測のためのカメラ方向保持)や要求性能があって設計されたものではない。

また無人機による計測というアイデアには、計測手段としての実現可能性や、解決すべき問題点などに未知な部分が多い。そこで研究代表者は今回の助成に先立ち、岩手大学の若手基礎研究支援経費へ応募採択され、試作無人機GAV-1を作成した。本機の離着陸はラジコンによる手動操縦だが、上空では自動制御による姿勢制御が行われる。また地上撮影用に200万画素のデジタルカメラを搭載している。この試作機を用い、共同研究者と協力して可視光による撮影実験を試み以下の知見を得た。

- (1) 平均風速3m/s以下の環境で、機体を目視しながら手動操縦で高度50mを飛行することは容易。このとき画角60°のカメラで約60m四方を連続撮影可能。より広域のデータを効率よく取得する

- ためには上空での操縦を自動化し、100m以上の高度からの撮影が望まれる。
- (2) 平均風速4m/s以上の環境では風による姿勢変化が大きく、機体直下の撮影は困難。また機体の揺動により画像にブレを生じる。一方、プロペラの回転による機体振動は小さく、機体に直接固定されたカメラによる撮影に悪影響はない。
 - (3) 軽量のため滑走路を必要とせず、手投げで容易に発進可能。回収時は稲の上に着陸しても機体、稲ともに損傷はない。
- この実験で得られた画像の地上解像度は約6cmであり、より高解像度の画像センサを用いれば、高空から同程度の地上解像度を実現する見込みが得られた。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

- (1) 自動制御により観測高度100mを保って飛行し、搭載したデジタルカメラ型マルチスペクトルセンサにより10cm級地上解像度のマルチスペクトル画像データを撮影可能な低コスト小型無人機の開発
- (2) 開発した無人機の農業用画像遠隔計測ツールとしての基礎的有効性評価

3. 研究の方法

(1) 無人航空機の開発方針

本研究で開発する無人航空機の形態は、農業散布等に利用されているヘリコプター型ではなく、固定翼機型とした。これは、固定翼機は飛行中の振動が少ないためヘリコプター型に必要とされるカメラ防振台が不要となり機体の小型軽量化、ひいては機体の低コスト化に寄与するものと考えたためである。計測用カメラ(図1)は機体の直下方向に向



図1: ADC3 マルチスペクトルカメラ

け固定した状態で搭載されるものとし、地上オペレータは機体の水平面上での飛行コースおよび撮影タイミングを指示することで撮影を行うものとする。

カメラは固定焦点のため、自動制御により撮影に適正な一定高度を保持するものとする。また機体直下の目標を画角内に収めるため、自動制御により水平直線飛行状態での機体姿勢が一定に保たれることを促す。

運用にあたっては滑走路等の地上設備の存

在を期待せず、手投げにより離陸し不整地（草地、作物上）へ着陸回収する。不整地において着陸脚の存在はむしろ転覆による機体破損の原因となるため、機体は脚を持たず、胴体構造に不整地への着陸に耐えられる衝撃吸収性を持たせることとする。

着陸時の障害物への軽度の衝突を前提とし、応力集中による機体破損を防ぐために主要部分の結合は過大な負荷が加わったとき分離するような構造とする。また衝突後機体のアラインメントが変化することを避けるために金属部品の使用を最小化し、樹脂、複合材、発泡材等を主な構造材料として用いる。観測ミッションは離陸後手動操縦により観測高度 100m まで 1 分以内に上昇し、自動制御系を動作させ 30 分程度滞空して、地上オペレータの指示による地上撮影を行うことを想定した。機体は通常のラジコン飛行機が必要とする機材一式を搭載するほか、観測用カメラおよび自動制御機器、無線通信機器等のために約 600g のペイロードを確保することとする。

(2) 小型無人航空機の開発

上記開発方針に従い、段階的に試験機を開発して最終的な要求を満足することを計画した。

第 1 段階 (GAV-2 実験機)

- ① 不整地での繰り返し運用可能な機体構造の開発
- ② 搭載電子機器の開発（基本的機能の開発および機能確認）
- ③ ミッション要求に向けた飛行性能の段階的拡大

第 2 段階 (GAV-3 実験機)

- ① GAV-2 からの知見に基づく機体構造の改良、ミッション最適化
- ② 搭載電子機器の開発（全機能の開発）
- ③ ミッション要求を満たす飛行性能の確認

(3) 小型無人飛行機を利用したリモートセンシングの有効性評価

- ① 東北農業研究センター内の水田に、窒素施肥レベルを変えた栄養状態の異なる試験区を作成する。計測前に、各試験区を葉緑素計測器 (SPAD) で計測する。また、イネいもち病菌を人工接種して、いもち病感染圃場を作成する。計測前に、病害被害度調査を行う。
- ② GAV-3 にデジタルカメラ (可視画像観測用) および ADC3 (近赤外域観測用) を搭載して試験圃場の計測実験を行う。
- ③ 開発した無人機の単位時間当たりの計測面積や運用可能日数などを明らかにし、農業現場における画像遠隔計測ツールとしての総合的な実用性、有効性を評価する。

4. 研究成果

本研究期間を通じて 2 種の小型無人機を開発し、実環境における画像遠隔計測実験を行った。

(1) GAV-2 の開発

GAV-1 実験機から得られた知見に基づき、第 1 段階の試験機として GAV-2 実験機 (図 2) を開発した。設計には 3D-CAD を活用し、予

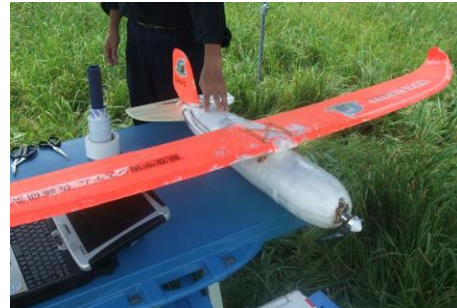


図 2 : GAV-2 (後期形態)

め搭載機器を含めた重心位置の検証等を行いつつ形状の決定を行った。

機体構造 軽量かつ大きな衝撃吸収性を持ち、経験的に相当なハードランディングであっても損傷の可能性が小さい素材である発泡ポリプロピレン (EPP) を胴体の構造材料に用いた点に特色がある。

通常 EPP の 3 次元成型には高価な金型の作成が必要になるが、岩手大学工学系技術室技術職員 菊池護氏の協力を得て、EPP 素材の精密切削加工技術を開発した。これにより金型を作成することなく 3D-CAD でデザインされた機体を低コストかつ短期間で作成可能となった。GAV-2 の胴体部は上記加工技術による無人機作成の実証例である。

多くの低コスト UAV はオーソドックスなバルサフィルム張り構造を採用しているが、部品点数が多く、組み立てに時間と技術を要する。また衝撃吸収特性に乏しいため不整地への胴体着陸では容易に破損し機体の再利用が困難である。またコスト的理由で箱形断面形状とする場合が多く、結果として大きな有害抵抗が発生する。

一方 GAV-2 の胴体は楕円断面形状で空力的に優れる (図 3)。胴体は一体成形された上下 2 つの部品のみで構成され、ファスナーにより結合される。そのため組み立てに技術を必

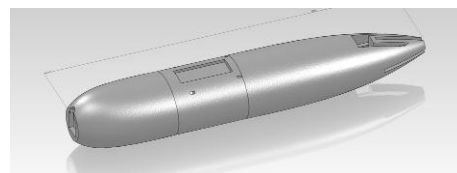


図 3 : GAV-2 胴体外形

要とせず、各種機材を搭載する際の作業空間を広くとることが可能なため機器の搭載作業・メンテナンスが容易である (図 4)。EPP

は圧縮強さに優れる一方で引っ張り強さに乏しいため、引っ張り力が作用する箇所はグラスファイバーにより補強された。

動力系統 プロペラ駆動用に200WクラスのDC ブラシレスモータを使用した。着陸時に

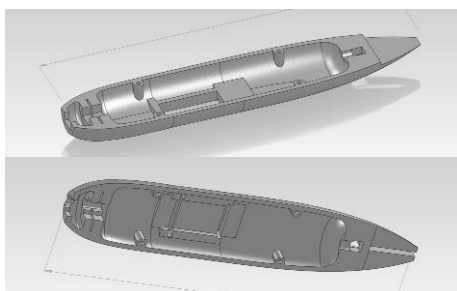


図4：GAV-2 上下胴体部品

プロペラが地面と接触して破損することを防ぐため、折り曲げ式プロペラを採用した。静止最大推力は約1kgfで、2500mAhのLi-Poバッテリーを使用した場合の推定飛行時間は約17分間であった。

飛行制御機器およびミッション機器 高度および縦運動の自動制御系開発を行うことを目的とし、PIC24F マイコンを使用した制御基板を独自に開発した。RC受信機(9ch)、RCサーボ(2ch)、絶対圧センサ、慣性計測装置(IMU)、2.4GHz帯無線通信モジュール等が接続された。

計測用カメラは胴体下部、重心位置直下に機体下向きに固定され、マウントは3D-CADで設計し3Dプリンタを用いて作成された。レンズは45度の画角を持ち、高度100mからおおよそ100m四方の領域を撮影可能であり、撮影画像の地上解像度は10cm級である。撮影タイミングは地上オペレータから無線で指示できる。

操縦性・安定性 初期形態ではGAV-1と共通の主尾翼(発泡材製)を使用し、各尾翼容積比は実績のあるGAV-1と同様となるよう設計された。そのため操縦性における困難はなかった。縦安定については尾部の重量が当初の見積より過大になったため十分な安定余裕(S.M.)を確保することが難しかったが、非熟練操縦者でもミッションの遂行に困難がない程度であった。また初期形態の横操縦はラダーのみであったが、後期形態はエルロンを備える。

ミッション要求に向けた飛行性能の拡大 初期形態では2500mAhのLi-Poバッテリーを搭載した場合の全備重量はおおよそ1000gであった。初期形態ではGAV-1と共通の翼面積約34.4dm²の主翼を用いたが、観測高度での実用滞空時間は7分未満でありミッション要求を大幅に下回るものであった。

初期型が無風状態で水平飛行を維持するためにはGAV-1と比べ主翼取付角の増加と大きなスロットル開度が必要であり、高抵抗状

態での効率の低い飛行であった。

これは機体重量増加に対する翼面積不足が根本的原因と思われたため、後期形態では約41.6dm²の大型の主翼を用いた。これにより観測高度において実用上10分以上の滞空が可能になった。

大型主翼にはエルロンが装備され、ダッチロールモードをあまり励起せずに旋回が可能となり、全飛行時間において直下を撮影可能な時間をより長くすることができた。

また制御系の開発には機体の動的モデルを用いず、飛行実験を繰り返す事により適当なフィードバックゲインを決定した。ピッチ角姿勢安定化制御のゲインは基本的に限界感度法に基づき決定され、高度保持制御系のゲインは試行錯誤的に決定された。

(2) GAV-3の開発

GAV-2 開発を通じて得られた主な知見は以下の通り

- EPP製胴体は衝撃吸収性に優れ、不整地に20回以上の胴体着陸を行っても大きな損傷はなかった。
- 構造材に発泡材を多用することで、必要な剛性を保ちつつ軽量、低コストの機体を開発可能。また一体化構造を多用することで組み立てに熟練していなくともアラインメント精度を保つことが可能。
- 3D-CADと切削加工による作成は開発中の機体構成の変更を迅速にする。
- 将来的に高次制御系の実装や3軸周りの制御、誘導・航法制御等の実装を行うにはより大型のマイコンが必要。
- 観測高度で30分程度の滞空を実現するためには、機体の低抵抗化およびバッテリー容量の増大が必要。

以上に基づきGAV-3実験機(図5)を開発した。

機体構造 胴体の有害抵抗低減のため断面形状を卵形で必要最小限の断面積を持つものに改良した(図6)。また各部にトラス構造を導入し、剛性を向上させた。



図5：GAV-3

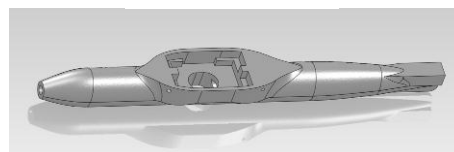


図6：GAV-3 胴体外形

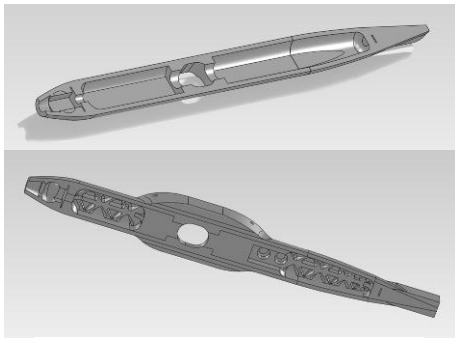


図 7 : GAV-3 上下胴体部品

主翼取付部下にはカメラベイを設け、胴体を分解することなくカメラの操作を可能な構造とした(図7)。

内部に搭載する機材の多くは GAV-2 と共通であり、胴体容積・形状はそれらに最適化され無駄な機内空間を極小化した。

動力系統 モータおよびプロペラは GAV-2 と同一であるが、バッテリー容量を 5500mAh に増大した。

飛行制御機器 mbed マイコンを使用した制御基板を独自に開発した。RC 受信機(9ch)、RC サーボ(5ch)、絶対圧センサ、慣性計測装置(IMU)、2.4GHz 帯無線通信モジュール、シリアルデータロガー等が接続された。センサ類は I²C バスインターフェースを通じて接続され、今後ピトー管装置、GPS 等を容易に追加可能である。上記インターフェースの開発には岩手大学工学部ものづくりエンジニアリングファクトリー 学内カンパニー「いわてエアロノーマスシステムズ」の協力を得た。

電子機器の安定動作のために電源を動力系と分離し、450mAh の Li-Po バッテリーを搭載した。

操縦性・安定性 バッテリー重量が増大した結果十分な S.M.を確保出来るようになり、姿勢安定化なしの状態での飛行性が向上した。飛行制御系のゲインは GAV-2 で用いたものをベースとして若干の試行錯誤を経て設定した。

(3) ミッション要求に対する飛行性能の適合性確認および実環境での有効性確認

GAV-3 の全備重量は、5500mAh の Li-Po バッテリーを搭載した状態で約 1600g である。この状態での推定飛行時間は約 37 分間であり、当初の目標である 30 分程度の滞空が可能と思われる。

盛岡市内において上昇性能および高度維持制御系の性能確認を行った結果を図 8 に示す。予定観測高度 100m までの上昇時間は約 28s であり当初の目標を満足する。高度維持制御が行われている間の高度変化は最大でも ±7m 以内であり、固定焦点カメラでの撮影に十分な精度を達成した。

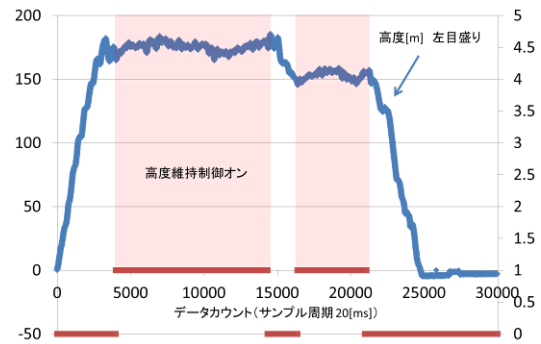


図 8 : GAV-3 高度維持制御実験

搭載した ADC3 カメラによる撮影画像(近赤外線領域)を図 9 に示す。



図 9 : ADC3 画像 (高度 180m)

(4) 小型無人飛行機を利用したリモートセンシングの有効性評価に向けた準備
計測予定圃場で、水稻、ダイズ、コムギを栽培した。画像遠隔計測ツールで作物の栄養診断が可能かどうか検討するため、窒素施肥レベルを変えて栄養条件の異なる作物を栽培した。葉緑素計測器 (SPAD) で窒素施肥量の異なる試験区を計測したところ、窒素施肥量に比例した様々な SPAD 値をもつ試験区が作成されていた。イネいもち病菌を噴霧接種することにより、イネいもち病発生圃場を作成した。

以上の通り、本助成期間を通じて以下の成果を得た

- 発泡材を主な構造材料に用いた堅牢な小型無人航空機の開発技術
 - 3D-CAD/CAM, 3D プリンタ, デジタル/アナログ混成 ASIC, ラピッドプロトタイプリングマイコンモジュール等を利用した, UAV システムの高速な開発技術
- 報告者の知る限り国内においてこれら両方の技術を持ち、実用的ミッションへ利用可能な UAV を開発しているグループは見当たらず、国際的にも先進的な成果と思われる。当初の研究計画のうち UAV システムの開発に多くの時間を費やしたため、期間中に十分

な実用性評価を行うことが出来なかった。そのため今後は開発したシステムを用いて作成した試験圃場の計測実験を行い、農業現場における画像遠隔計測ツールとしての総合的な実用性、有効性を評価する予定である。また飛行制御系に関しても動的モデルの同定作業を行い、突風外乱の影響を考慮した制御系を開発する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 小林隆・笹原剛志・神田英司・兼松誠司・石黒潔・菅野洋光, 出穂後の積算気温で穂いもち感染可能期間を予測, 査読有, 植物防疫, 64巻71-74, 2010
- ② 小林隆・菅野洋光・神田英司・南野謙一・PRIMA, O. D. Y., Google マップによる気象予測データを用いた東北地方の水稲気象被害軽減システムの開発, 査読有, 植物防疫, 64巻794-800, 2010

[学会発表] (計5件)

- ① 菊池 護, 佐藤 淳, 加賀 亨: 自律的無人航空機システムの開発, 平成24年度愛媛大学総合技術研究会, 愛媛大学城北キャンパス, 2013.3.7-8
- ② 藤田 芳大, 佐藤 淳: 固定翼 UAV の Prop-hanging 飛行状態での姿勢安定化に関する研究, 日本航空宇宙学会 北部支部 2012 年講演会, 室蘭工業大学, 2012.3.15-16
- ③ 佐藤 淳: 線形リセットシステムの区分的2次リアプノフ関数に基づくL2性能解析 特定のジャンプ/リセット行列に依存しない結果, 計測自動制御学会 第12回制御部門大会, 奈良県文化会館, 2012.3.14-16
- ④ A. Satoh: State Feedback Synthesis of Continuous-time Reset Control with L2 Performance Bound: Simultaneous Design of Controller and Resetting Condition, 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, UCSC, August 28-September 2, 2011
- ⑤ 佐藤 淳: 状態フィードバック型動的リセット制御の設計 連続時間制御器およびリセット則の同時設計, 計測自動制御学会 第11回制御部門大会, 琉球大学 (千原キャンパス), 2011.3.16-18

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

小林 隆 (KOBAYASHI TAKASHI)
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センター・主任研究員
研究者番号: 00355273

(3) 研究協力者

菊池 護 (KIKUCHI MAMORU)
岩手大学・技術部工学系技術室・技術専門職員