

マルチセンサを用いた無人航空機の遠隔誘導方法

シャオ・リヤ
ンSchool of Automation
Shenyang Aerospace University
Shenyang, China
connyzone@126.com

陳国棟

School of Automation
Shenyang Aerospace
University Shenyang, China
cgd1128@163.com

趙志朗

School of Automation
Shenyang Aerospace University
Shenyang, China
zsrou2018@163.comトン・グアン
ボSchool of Automation
Shenyang Aerospace University
Shenyang, China
694859836@qq.com

姜 玲平

School of Automation
Shenyang Aerospace
University Shenyang, China
1536118384@qq.com

Wei Zhang

南京科学技術大学機械工学部
中国・南京市
337456998@qq.com

Abstract—Aiming the problem that single sensor cannot balance of guidance distance and accuracy, the paper proposed a remote guidance method for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based on multi-

sensors. 本論文では、まず、遠隔誘導と自律着陸タスクについて紹介する。そして、ハードウェアと制御方法を設計する。着陸のプロセスは、長距離と近距離の2段階に分けられる。異なるセンサの特性を活かすため、長距離ステージではGPS/IMU（慣性計測装置）ハイブリッドガイダンス、近距離ステージでは目視ガイダンスを用いています。また、その測位・誘導方法についても詳しく紹介する。近距離ステージでは、移動するUGV（Unmanned Ground Vehicle）への正確な着陸の要求に応え、Apriltagに基づく視覚誘導法を提案し、UAVの姿勢と相対距離の計算を完了させた。マルチセンサフュージョン手法としてEKF(Extended Kalman

Filter)を用いている。最後に、本手法をクワッドローターとメカナムUGVに適用し、屋外実験を実現し、解析した。実験結果から、提案手法の精度とリアルタイム性は、UAVが遠距離から移動型UGVに着陸する際の要件を満たしていることが示された。

キーワード：移動体の自律着陸，遠距離・近距離誘導，マルチセンサ，EKF，Apriltag

I. はじめに

科学技術の急速な発展に伴い、航空ロボット（無人航空機、UAV）や地上ロボット（無人搬送車、UGV）の応用は、世界中の研究者の注目を集めています。UAVは広範囲を素早く探知することができますが、その分、耐久性に限界があります。UGVは移動速度は遅いですが、地上を移動する利点から耐久性に優れています。そのため、UGVの空母型航空機は、多くの研究者に注目されています。UGVのキャリアベース航空機では、UAVの着陸を遠隔で誘導することが、UAV/UGVヘテロジニアスシステムの調整のための重要な基礎となります。

UGVのキャリアベース航空機による誘導の鍵は測位であり、測位の精度は誘導の質に直結する。現在、主な測位方法として、GPS測位[1]、基地局測位[2]、WiFi測位[3]、Bluetooth測位[4]、画像測位[5]等がある。しかし、単一のセンサーによる測位では、以下のよう

な共通の問題がある。

本研究は、中国国家自然科学基金（グラント61973222、61503255、61906125）、中国航空科学基金（グラント2016ZC54011）、遼寧省自然科学基金（グラント2015020063）の支援を受けています。

978-1-7281-3792-6/19/\$31.00 ©2019 IEEE

の位置決めを行う。一般に、測位距離の長いセンサは測位精度が低く、測位距離が短くなるにつれて精度が高くなると言われている。Sofiaら[6]は、マルチセンサフュージョンを用いたロボット位置決めシステムを提案した。また、Liら[7]はマルチセンサフュージョンを用いた車両位置決めシステムを提案した。シミュレーションと実験から、両者ともより高精度な位置決めを実現することができた。測位精度の向上に伴い、誘導技術も急速に発展してきた。誘導技術は、空中給油、空母艦載機の着陸、ミサイルの迎撃などに広く利用されている。Huら[8]は、カルマンフィルタを用いて、GPSと視覚情報を融合し、2機のUAVの相対位置を求めています。この研究では、改良された線形二次レギュレータがUAVを制御し、正確なドッキングを実現しています。Tangら[9]は、IMU、GPS、視覚センサーの情報に基づいて、UAVの正確な位置決めを実現している。彼らはカルマンフィルタにより正確な相対位置を算出し、最終的に高精度なUAVの自律着陸を実現しています。いずれの手法も高精度な誘導を実現できるが、シミュレーションでの検証のみである。Wenzelら[10]は、赤外線カメラを用いてUAVの着陸を実現しています。直射日光の当たらない場所での着陸は、より効果的です。Leeら[11]は、UAVのパトロールを実現し、追跡と着陸を視覚に基づいて行っています。しかし、これらの手法はすべて視覚誘導であるため、長距離の誘導には適していません。Araarら[12]は、静的および動的なターゲットへのクワッドローターの自律的な着陸を研究し、姿勢推定が可能な新しい着陸プラットフォームを設計しています。この研究では、拡張カルマンフィルタと拡張ビジュアルソリューションデータをフュージョンに使用することで、ターゲットを見失う可能性を低減しています。高速で移動する車両へのUAVの着陸について、Borowczykら[13]は、IMU、GPS、視覚計測を組み合わせて位置を提供するシステムを構築しています。彼らの研究では、速度と重力補償された加速度データは、グローバルなNED (North-East-Down) フレームで直接表現されます。また、携帯電話を着陸地点に設置し、GPSとIMUのデータをWiFiでUAVに送信します。カルマンフィルタを採用し、センサデータを融合してクワッドローターの位置を推定する。しかし、WiFiの通信距離には限界があるため、長距離誘導には向いていない。まとめると、上記の方法の多くは、短距離での追尾・着地の場合にのみ適している。UGVに遠距離から接近・着地する場合は、誘導方式に工夫が必要である。

本論文では、UAVが遠距離から移動式UGVプラットフォームに接近・着陸するタスクを対象に、マルチセンサに基づく誘導方法を提案する。によるものである。

は、誘導距離と精度の関係をバランスさせることができる。最後に、提案手法を物理実験により検証し、移動するUGVに遠距離からUAVを着陸させるタスクを実現した。

II. UAVのモデリングと制御

A. モデリングのプラットフォーム

QStudioRPは、カナダのQuanser社が開発したシミュレーション・プラットフォームです。のための統合オープンプラットフォームです。クワッドローターの開発、設計、シミュレーション、テスト[14]。ハードウェアシステムには、主に、モータ/ロータ、エンコーダ(センサー)、パワーモジュール、クアッドローターで構成されています。図1および表1に示す。



図1.QStudioRPシミュレーションプラットフォームの

主な構成。表1.デバイスの仕様

名称	価値
ヘリコプタ本体質量	1.39kg
ヘリコプタ本体長さ	48cm
ベース寸法	17.5cm17.5cm
エンコーダ分解能	8192 カウント レヴ
ピッチ角範囲	75(37.5度)
ヨー角の範囲	360度
プロペラ径	20.3cm
プロペラピッチ	15.2cm
モータ電機子抵抗	0.83
モータ電流-トルク定数	0.0182 Nm A

B. システム説明

定義[15]によれば、クワッドローターは動機付けされる

は4つのモータで駆動され、ヨー、ピス、ロールの3つの姿勢を持つ。 $v(x, y, z, \cdot, \cdot) R^6 \cdot (x, y, z)$ R と定義する。³ はそれぞれ位置と $(\cdot, \cdot, \cdot) R^3$ を示す。

これ Kt と $ク$ はそれぞれ逆回転
です n $ー$
。 $ー$
 $ー$
 $ー$
 $ー$

J はピッチ軸等価慣性モーメント、 J_{\diamond} はロール軸等価慣性モーメント、 J はヨー軸等価慣性モーメントを表す。 V_f , V_b , V_r , V_l はそれぞれ前、後、右、左のモータ電圧を表す。

C. リニアクアドラチックレギュレータ(LQR)を用いたコントローラ $\dot{x} \dot{\theta} \dot{\phi} \epsilon$

状態ベクトル $x(t) [\cdot, \cdot, \cdot]$ を定義する。 ,

アウトプット ベクトル $y(t)$, 入力 $[\cdot, \cdot] R^q$ ベクトル $u(t) [V, V, V, V]^T$.線形化後、姿勢チャネルの状態方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_a(t) &= A_a x_a(t) + B_a u(t) \\ y_a(t) &= C_a x_a(t) \end{aligned}$$

LQR (Linear Quadratic Regulator) の理論によると、コントローラは。

$$u_a(t) = -L_a x_a(t) + L_r a(t)$$

ここで、 L_a と L_r はフィードバックゲイン行列、フィードフォワードゲイン行列のゲインマトリックスで $u_a(t)$ は入力コマンドです。を選んでください。パフォーマンス指標は

$$J = \frac{1}{2} e^T(t_f) P e(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [e^T(t) V(t) e(t) + u^T(t) R(t) u(t)] dt \text{ の場合}$$

(4)において、 $e_a(t)$ 、 $V(t)$ 、 $R(t)$ はそれぞれの重み付け行列を作成します。 $e_a(t)$ 、 $e_a(t)$ 、 $u_a(t)$. このときパフォーマンス指標 J が最小になる、がある。

$$L = R^{-1} B^T P - R^{-1} B^T P B_a [P B_a R^{-1} B_a - A_a^T C_a V]^{-1} C_a V$$

ここで、 P はリカッチ方程式の解であり、 V および R は対角行列である。(2)、(5)より、LQRによる閉ループ制御系は次のようになる。

はヨー角、ピッチ角、ロール角を表す。そして、運動の運動エネルギー $T_{trans} = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{x}$ と、運動の運動エネルギー $T_{trans} = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{x}$ を求めることができる。回転エネルギー T_{rot} を表す。ここで m

機体の質量ラグランジュ法を用いると、クワッドローターの動的モデルは次のように示される[16]。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}} &= \frac{K}{J} (\mathbf{V} \mathbf{V})^T K_{tc} \mathbf{l}(\mathbf{V} \mathbf{V}) \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \frac{K}{J} (\mathbf{V}_f \mathbf{V})_b \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \frac{K}{J} (\mathbf{V} \mathbf{V})_{r \quad l} \end{aligned}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_y = \bar{\mathbf{A}}_y - \bar{\mathbf{A}}_{Ba La} \mathbf{x}_{Ba} \bar{\mathbf{L}}_r \bar{\mathbf{a}}_h$$

III. UAVの設計と実装

A. UAVハードウェアシステムの構築

このUAVは、フレームに高強度・軽量のカーボンブレイズ、フライトコントローラーにPixhawkを採用しています(図)。

2).STM32コントローラは、SBUSエンコーダへのPWMを生成します。STM32コントローラにはOpenMVカメラが接続されている。GPSはフライトコントロールに接続されている。UAVとUGVの通信には無線データ通信ステーションを使用しています。

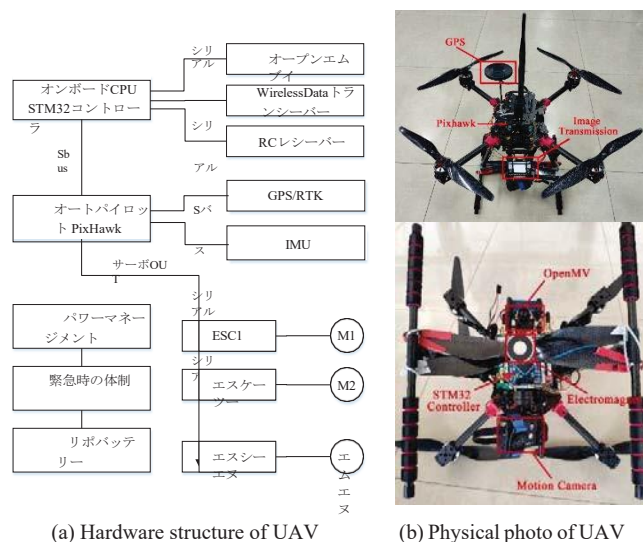


Fig. 2. UAV used in this research.

図2(b)に示すように、UAVには2台のカメラが搭載されている。モーションカメラはUAVの下方を撮影し、その画像を無線で送信してUAVの下方を監視するために使用される。OpenMVのカメラはApriltag[17]を識別するために使用され、UAVとUGVが接近したときに誘導するための画像センサである。OpenMVは無線伝送が苦手なため、デュアルカメラという方式を採用した。設置場所が異なるため、2つの画像も異なる。

B. SBUSプロトコルに基づくアナログRC

本論文では、UAV本来の安定性を維持し、飛行制御の開発負荷を軽減するために、SBUSプロトコルに基づくアナログ遠隔制御方式を提案する。本手法では、信号発生装置を用いてUAVを制御するための遠隔制御信号を模擬する。UAVにはPixhawkフライトコントローラを搭載し、信号変換装置と接続する(図3)。

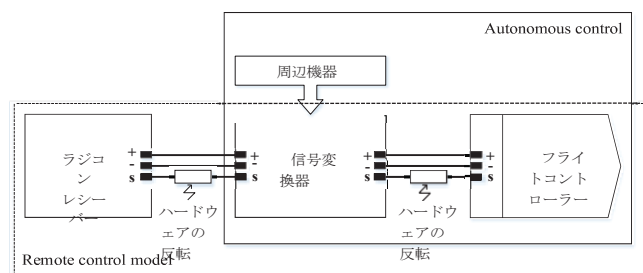


図3.クワッドローター制御システムの構成図。

UAVは、手動ラジコンモード、自動飛行モード、緊急停止モードの3つの飛行モードを持っています。

マニュアルRCモードでは、受信機はリモコンデータをリアルタイムに受信し、SBUSプロトコルにより信号変換器に送信します。リモコンからのデータは、信号変換器により何も処理されずにフライトコントローラに渡される。

自動飛行モードでは、まずコントローラーが4つのモーターの入力を計算し、その信号をエンコードして送信することで、自動飛行の目的を達成します。

を暗号化して送信することで、UAVの定点ホバリングの目的を達成し、飛行の安全性を確保します。

IV. マルチセンサーを用いた遠隔誘導方法

現在、位置決めや誘導については様々な方法がある。しかし、測定距離が長くなるにつれて精度が低下するという共通の問題がある。本論文では、図4に示すような遠隔誘導と精密な自律着陸の方式を提案する。

- 長距離ステージの目的は、UAVがUGVに接近するように誘導することです。
- 近距離ステージの目的は、着陸の準備をすることです。このとき、UAVの姿勢を維持する必要があります。

各ステージの測位・誘導方式は。長距離ステージではGPSとIMU (Inertial Measurement Unit) を、近距離ステージでは目視による測位を用いている。最後に、EKFを用いてデータを融合することで、UAVの正確な位置決めと誘導を実現する。

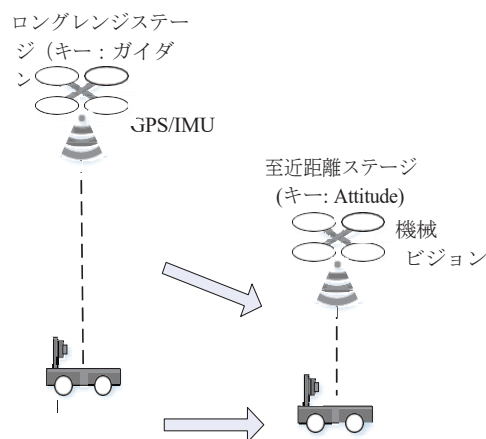


図4.遠隔誘導と精密な自律着陸のスキーム。

A. 長距離ステージでのGPSによるガイダンス

この工程では、UAVはUGVから遠く離れており、UAVとUGVの距離を早く縮めることが目的である。そのため、この段階では精度はあまり問題にならず、GPSによる測位方式が採用される。UAVとUGVの相対的な位置関係を把握するために、UAVとUGVにそれぞれGPSを搭載する。長距離ステージでの通信を図5に示す。

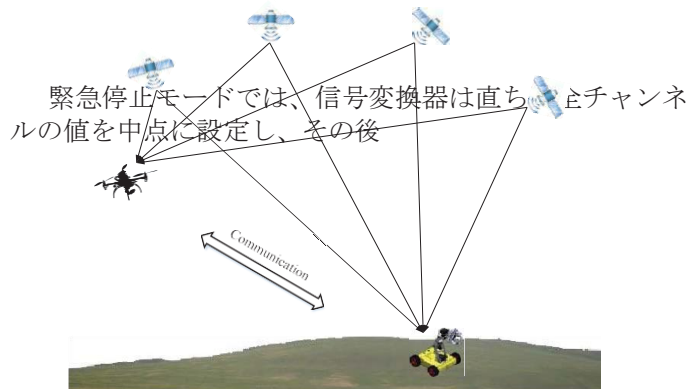
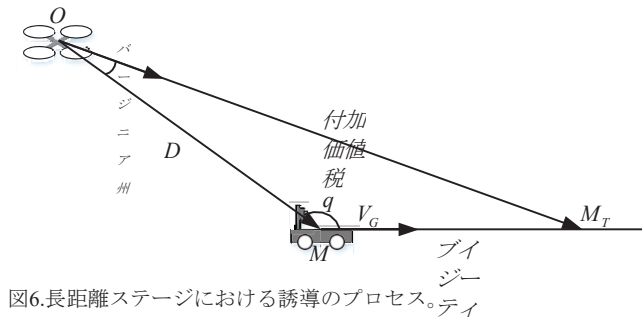


図5.GPSを用いた長距離ステージでの通信。

それぞれの緯度・経度を取得した後、UAVをUGVの近くまで誘導することができる。UGVが送信する

の方位、経度、緯度、平均速度 V_G をUAVにリアルタイムで送信する。UAVは上記により、UAVとUGVの距離 D と角度 q を算出する。

の情報を得ることができる。UAVの速度 V_A が既知であることを前提に、長距離ステージにおける誘導の過程を図6に示す。ここで、 T は飛行時間である。



プリクラクションポイントガイダンス法を用いると、ガイダンスプロセスは次のように記述される。

$$V_G \sin q \quad V_A \sigma V$$

アークサイン

角度を取得した後、UAVは以下の式でロール軸とピッチ軸の速度成分を計算することができる。を作成し、コントローラに送ります。その後、UAVはUGVの方向へ飛ぶ。

B. クローズレンジ・ステージのアプリタグに基づくガイダンス
アプリアタグ[18]は、改良型ビジュアルポジショニング

ARToolkit [19]とARTag [20]をベースにしています。これはビジュアルリファレンスライブラリ[21]であり、ロボットやUAVで広く利用されている
ポジショニングガイド[22]を参照してください。アプリタグでは、シンプルなクイックQRコード (Response Code) は、4~12ビットのデータしか持たないため、遠距離でも容易に検出することができます。

Apriltagは、ターゲットの識別と追跡だけでなく、ターゲットの3Dポーズを取得することができます。カメラの解像度、焦点距離、タグの大きさがわかれば、アルゴリズムはタグの種類、ID、距離、姿勢を特定することができます。

1) タグの検出と識別

タグは、図7のように内側が黒、外側が白の四角形である。

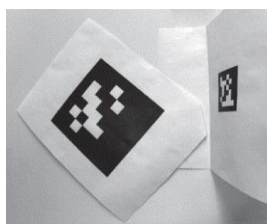


図7.タグ

この各成分の画素に線分を当てはめる (図8 (d))。線分の方法はグラデーションの方法によって決まり、左側が暗く、右側が明るい線分となる。

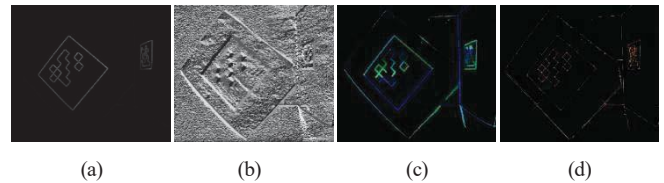


図8.検出処理。

この時点で、Tagは有向セグメントの集合に変換され、深さ4の再帰的深さ優先探索に基づいて、四辺形のセグメント列が計算される[17]。

2) タグからOpenMVカメラまでの距離と角度の計算
ホモグラフィ変換 (ある平面をある平面に写像する) では、外部パラメータ推定、3×3ホモグラフィ行列 (マッピング時の変換行列。

で表される行列を計算する必要がある。これは、Tagの座標系を2次元画像の座標系にマッピングするものである。ホモグラフィ行列は、DLT (Direct Linear Transform) アルゴリズムによって計算される。このとき、回転

E の成分を R_{ij} で表すとと並進

コンポーネントは T_k で表される。 s

はスケールファクターなので

$$\begin{matrix} h & h & \eta & f & 0 & 0 & 0 & R_{00} & R_0 & T_x \\ H & h & h & h & s & P & E & s & 0 & x \\ & 10 & 11 & 12 & & & & & & y \\ h & h & & 0 & 0 & 1 & 0 & 20 & 21 & \zeta \\ & 20 & 21 & 22 & & & & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

ここで h はホモグラフィ行列 H の要素である。 x 、 h_{ij}

と f はそれぞれカメラの焦点距離である。 P がフルランクでないため、 E

を直接解くことはできない。(6)の右辺を計算することで、各ヒジューは一組の方程式に書き表すことができる。

$$\begin{matrix} h_{00} & sR_{00} & f \\ h_{01} & sR_{01} & f \\ h_{02} & sR_{02} & f \\ h_{10} & sR_{10} & f \\ h_{11} & sR_{11} & f \\ h_{12} & sR_{12} & f \\ h_{20} & sR_{20} & f \\ h_{21} & sR_{21} & f \\ h_{22} & sR_{22} & f \end{matrix}$$

の要素です。 R_i と T_k を容易に決定することができる。

タグ検出アルゴリズムは、まず、各画素の勾配の大きさ (図8 (a)) と方向 (図8 (b)) を算出する。グラフを用いた手法により、勾配の方向と大きさが似ている画素は、コンポーネントにクラスタリングされます (図8(c))。重み付き最小二乗法を用いて

回転行列の各列は単位ベクトルでなければならないので、 s が異なればこの制限を満たす。回転行列は2列しかないので、 s は行列の振幅の幾何平均として設定することができる。最後に、ホモグラフィ行列により、タグの相対座標系が画像の座標系に写像される。さらに、タグからカメラまでの距離と角度が最終的に求まる。

OpenMVのカメラがUGVのデッキにあるTagを認識すると（図9）、自動的にApriltagのガイダンスに切り替わる。



図9 UGVのデッキUGVの甲板。

C. マルチセンサーフュージョン方式

長距離ステージでは、GPSとIMUの情報を統合する。近距離ステージでは、GPSとIMUの融合結果を再度Apriltagで融合する。また、ガイダンスにおいて、2つのステージの間に明確な区分はない。OpenMVのカメラでTagを識別した後、自動的に近距離ステージに切り替わります。

マルチセンサデータフュージョンには、EKF (Extended Kalman Filter) [23]が採用されている。EKFは、非線形システムに対して一次近似された離散モデルを使用する。EKFアルゴリズムは、各センサの制限を補正することができる。非線形システムにおいて、一般的な確率過程は以下のような離散系で記述することができる。

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k, v_k) \\ y_{k+1} &= h(x_{k+1}, w_{k+1}) \end{aligned}$$

ここで x_k およ y_k は状態ベクトルと観測値、 u_k およ v_k はシステム入力、 w_k はシステム入力、 v_k は観測関数である。ここで w_k は白色ガウス雑音であり、測定値異なる共分散行列 Q_k を持つ雑音と R_k をそれぞれ定義する。線形化された観測関数により、先験的な状態推定値と共分散行列は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} x_{k+1}^+ &= f(x_k^+, \mu, \varrho) \\ P_{k+1} &= A P_k A^T + Q_k \end{aligned}$$

どこ x_{k+1}^+ 、 P_{k+1} と x_k^+ は、時刻 k における先験的な状態である。はそれぞれ時刻 $k-1$ の先験的共分散と時刻 k の事後的な状態である。予測値(13)、(14)より、事後推定値は次のようになる。

$$K_{k+1} = P_{k+1}^+ h^T (h P_{k+1}^+ h^T + R_{k+1})^{-1}$$

どこ K_{k+1} 、 x_{k+1} と P_{k+1} はカルマンゲインである。はそれぞれ事後推定値、事後共分散である。EKFは(11)-(16)を用いて、状態の推定と異なるセンサーの補完のために実装される。

V. 実験と解析

本実験では、実験の安全性を確保するために、UAVは常に可視範囲にいる。つまり、実験開始当初はUAVがUGVから大きく離れることはない(図10(a)の通り)。また、横転の危険を回避するために、UGVのデッキの下に電磁石を設置し、UAVの着陸後の保持に使用しています。

ピクチャーインピクチャーは、モーションカメラから返される画像です。OpenMVは無線伝送が苦手なので、ここではOpenMVの画像は提供していません。特にOpenMVの伝送はリアルタイム性に重大な影響を与えるので、シリアルポートでは不十分です。従って、本実験で提供する画像は全てモーションカメラのものであります。



図10.長距離ステージでのGPSによるガイダンス。

図10に示すように、このプロセスにより、迅速なを誘導する。UGVの上空に到達したUAVは、徐々に高度を下げて、UGVの甲板上にあるTagをOpenMVに認識させる。図10(d)(e)(f)では、Tagがはっきりと完全に写っているが、これはモーションカメラからの画像である。このように、OpenMVは、UGVの甲板上にあるTagを認識するために、はまだTagを認識していません。

UAVの高度が徐々に下がってくると、OpenMVはTagを認識する(図11)。



$$x_{k+1} = x_{k+1} - Kk_{k+1} - (zk_{k+1} - Hx_{k+1})$$

$$P_{k+1} = (I - Kk_{k+1} - H)P_{k+1}$$

(a) 近距離の初期段階

(b) UAVの姿勢調整

図11. Apriltagを用いた近接飛行時のガイダンス。

ここで、これらの図からは、切り替えの過程を直接見ることはできない。しかし、図11 (a) と (b) を比較すると、UAVの姿勢が明らかに変化しており、UAVとUGVは同じ方位にあることがわかる。

その後、UAVは徐々に姿勢と位置を調整する。最後にUAVはUGVの甲板に着地する (図12)。



(a) UAVは高度を下げ続ける (b) UAVの着陸成功
図12. UAVの着陸過程。

図12(a)では、TagはUAVの真下にはない。これは、モーションカメラの設置位置がOpenMVカメラと異なるためである。実際には、TagはOpenMVカメラの真下にある。UGVのデッキにUAVが接触すると、UAVの着地点が慣性で変化する。着地が安定すると、UAVの下にある電磁石がUAVをUGVのデッキにしっかりと固定する (図12(b))。

VI. 結論

本論文では、まず、遠隔誘導と自律着陸のタスクについて紹介する。次に、QStudioRPシミュレーションプラットフォームを用いてクワッドロータをモデル化し、LVQに基づく制御方法を提案する。さらに、クワッドロータをより効率的かつ迅速に開発するために、SBUSプロトコルに基づくマルチロータ自律飛行制御方法を提案する。次に、着陸プロセス全体を長距離と短距離の2つのステージに分けます。長距離ステージではGPS/IMUハイブリッドガイダンス、近距離ステージでは目視ガイダンスが使用されます。マルチセンサフュージョンでは、EKFを導入し、採用した。実験の結果、提案手法は、移動するUGVに接近し、着陸するUAVを誘導することができることがわかった。

参考文献

- [1] Xingchuan Liu, Qingshan Man, Henghui Lu and Xiaokang Lin, "Wi-Fi/MARG/GPS integrated system for seamless mobile positioning," 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 上海, 中国, April 7-10, 2013.
- [2] Matteo Ridolfi, Stef Vandermeeren, Jense Defraye, Heidi Steendam, "Experimental evaluation of UWB indoor positioning for sport postures," *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 1, pp. 168-187, 2018.
- [3] Chen Chen, Yan Chen, Yi Han, Hung-Quoc Lai and Feng Zhang, "Achieving centimeter-accuracy indoor localization on WiFi platforms: a multi-antenna approach," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 122-134, 2017.
- [4] Ling Pei, Jingbin Liu, Yuwei Chen, Ruizhi Chen and Liang Chen, "Evaluation of fingerprinting-based WiFi indoor localization coexisted with Bluetooth," *The Journal of Global Positioning Systems*, vol.15, pp. 3-14, 2017.
- [5] Guifeng Wu, Jie Zheng, Jiatong Bao and Shengquan Li, "Mobile robot location algorithm based on image processing technology," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol.2018, pp. 107-114, 2018.
- [6] Sofia Yousuf, Muhammad Bilal Kadri, "Robot localization in indoor and outdoor environments by multi sensor fusion," 2018 14th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, Pakistan, November 21-22, 2018.
- [7] Xu Li, Wei Chen, Chingyao Chan, Bin Li and Xianghui Song, "Multi-sensor fusion methodology for enhanced land vehicle positioning," *Information Fusion*, vol.46, pp.51-62, 2019.
- [8] Hu Zhu, Suozhong Yuan, and Qian Shen, "Vision/GPS-based docking control for UAV Autonomous Aerial Refueling," 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Nanjing, China, August 12-14, 2016.
- [9] Daquan Tang, Yongkang Jiao and Jie Chen, "On Automatic Landing System for carrier plane based on integration of INS, GPS and Vision," 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Nanjing, China, August 12-14, 2016.
- [10] また, "Automatic take off, tracking and landing of a miniature UAV on a moving carrier vehicle", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 61, no. 1-4, pp.221-238, 2011.
- [11] Daewon Lee, Tyler Ryan and H. Jin.Kim, "Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, MN, USA, May 14-18, 2012.
- [12] Oualid Araar, Nabil Aouf and Ivan Vitanov, "Vision based autonomous landing of multirotor UAV on moving platform," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 85, no. 2, pp. 369-384, 2017.
- [13] Alexandre Borowczyk, Duc-Tien Nguyen, André Phu-Van Nguyen, Dang Quang Nguyen, "Autonomous landing of a quadcopter on a high-speed ground vehicle," *Journal of Guidance Control & Dynamics*, vol. 40, no. 9, pp. 1-8, 2017.
- [14] Xiao Liang, Guodong Chen, Jiahui Wang and Zheyuan Bi, "An adaptive control system for variable mass quad-rotor UAV involved in rescue missions," *International Journal of Simulation: システム、科学と技術*, 17巻、29号、22.1-22.7頁、2016年.
- [15] Pedro Castillo Garcia, Rogelio Lozano, ミニフライングマシンのモデリングと制御.Springer: ロンドン, 2005, 142-147.
- [16] Fuyang Chen, Feifei Lu, Bin Jiang and Gang Tao, "Adaptive compensation control of quadrotor helicopter using quantum information technology and disturbance observer," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 1, pp. 442-455, 2014.
- [17] Olson E, "AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [18] Ksenia Shabalina, Artur Sagitov, Leysan Sabirova, Hongbing Li and Evgeni Magid, "ARTag, AprilTag and CALTag fiducial marker systems: comparison in presence of partial marker occlusion and rotation," 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Madrid, Spain, July 26-28, 2017.
- [19] Dawar Khan, Sehat Ullah and Ihsan Rabbi, "Factors affecting design and tracking of ARToolKit markers," *Computer Standards & Interfaces*, vol.41, pp. 56-66, 2015.
- [20] Cesare Celozzi, Gianluca Paravati, Andrea Sanna and Fabrizio Lamberti, "A 6-DOF ARTag-based tracking system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 1, pp.203-210, 2010.
- [21] Filippo Bergamasco, Andrea Albarelli and Andrea Torsello, "Pi-Tag: a fast image-space marker design based on projective invariants," *Machine Vision and Applications*, vol. 24, no. 6, pp.1295-1310, 2013.
- [22] Ralph Hartley, Behrooz Kamgar-Parsi and Cody Narber, "Using roads for autonomous air vehicle guidance," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 12, pp.3840-3849, 2018.
- [23] He Zhao and Zheyao Wang, "Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers With Extended Kalman Filter for Data Fusion," *IEEE Sensors Journal*, vol.12, no.5, pp.5, pp.943-953, 2012.