

機体の上下移動に基づく距離計測手法を実装した 写真撮影ドローンシステム

菅佐原俊介[†] 河野恭之[†]

概要：ユーザがスマートフォンのカメラ画像を通して指定した構図（撮影領域）を、自律飛行するカメラ搭載ドローンによって写真撮影するシステムを提案・実装する。適切な撮影位置までドローンを移動させることにより、ズーム機能を使用することなく撮影画像の画質が確保される。ドローンを垂直方向に上下移動させることで、正面カメラの取得画像に基づくステレオ視によってユーザから構図までの距離を計測する。計測結果から適切な撮影位置を仮定し、PTAMによる移動量の推定とビジュアルサーボによる誤差の修正を用いて、指定された構図と同等の写真を撮影する。評価実験の結果、本研究の距離計測手法は撮影領域と被写体の位置に制限されず、高い精度で行えることを確認した。移動量の推定手法では、一様なテクスチャの広がる地面においてPTAMの処理に不具合が生じて大きな誤差を有する結果が得られた。ビジュアルサーボでは、奥行き視差に関わらず特定の被写体に着目することで撮影領域に近い構図の静止画保存画像を取得できた。

キーワード：ドローン、写真撮影、距離計測、PTAM、ビジュアルサーボ

1. はじめに

ユーザがスマートフォンのカメラ画像を通して指定した構図を、自律飛行するカメラ搭載ドローンを使用して写真撮影するシステムを提案する。近年スマートフォンのカメラ機能の発達により、多くの人が高画質の写真を気軽に撮影できるようになっている。スマートフォンに搭載されたカメラの多くはデジタルズーム式を採用しているため、遠方の領域を拡大すると画質が低下する。光学ズーム式を備えたカメラを使用すればズームによる画質の劣化は発生しない。しかし、ズーム倍率が高くなると撮影時に手ブレの影響が大きくなるという欠点がある。そこで本研究では、ユーザがスマートフォンのカメラ画像を通してピンチ操作で指定した構図に基づいてカメラ搭載ドローンを撮影可能な位置まで移動させる飛行制御手法を提案する。適切な撮影位置までドローンが移動することによりズーム機能を使用することなく撮影画像の画質が確保される。ユーザの作業はスマートフォンを用いた構図の指定のみであるため直感的かつ負担が少ない。

本研究ではドローンを垂直方向に上下移動させ、正面カメラの取得画像に基づくステレオ視によってユーザから被写体までの距離を計測する。正面カメラが映す環境はドローンの移動目標と移動経路を含むため、実空間上の物体の形状と三次元位置を把握することで最適な移動経路を作成することができる。底面カメラで環境を俯瞰することで測量を行う技術が既に実用化されている[1]。それらのシステムでは奥行きの最大値が地面までの距離と等しいのに対して、正面カメラを用いる本システムでは奥行きに制約がなく、カメラから被写体までの距離が取りうる範囲を予め把握することができない。カメラ画像中から距離計測の対象とする物体を区別する手法が必要である。

2. 関連研究

樋口ら[2]は、ドローンに搭載したカメラの画像から撮影対象である人物を認識、追跡する自律飛行制御システムを実装している。この研究では撮影対象の人物を事前に設定する必要がある。自律的なカメラワークを実装しているが、構図の検討は行っていない。Quigleyら[3]は、PDAやジョイスティック、音声認識や飛行パラメータの直接指定などを採用した様々なドローン操作手法を評価している。ドローンを三次元空間内で移動させるには複数の制御信号を与えなければならない、操作が困難であるという問題がある。音声認識を用いた手法はユーザにとって直感的であるが、複雑な指示を与えることができない。筆者ら[4]は、ユーザがハンドジェスチャを用いて捉えた構図を肩に載せたPTZ（パン・チルト・ズーム）カメラで撮影するウェアラブルなシステムを開発している。きわめて狭い遠方の領域に対して撮影を試みる場合には肩載せPTZカメラで目標の領域を追跡することは困難である。カメラ搭載ドローンを撮影可能な位置まで移動させることでこの問題を解決できると考える。本研究では、ユーザがスマートフォンのカメラ画像を通して指定した構図とドローンの正面カメラ画像に基づいて、リアルタイムの飛行制御を行う。ユーザが視覚情報から直感的に指定した目標に対してその三次元位置までの飛行経路を自動で決定するため、ドローンの操縦を支援するインタフェースと考えられる。

3. 研究概要

ユーザはスマートフォンを構え、タッチパネルを介したピンチ操作によってカメラ画像から撮影したい写真の構図を指定する。また、撮影用のドローンをユーザの前方付近に待機させておく。システムの流れを図1に示す。ユーザが選択した矩形の領域をスマートフォンのカメラ画像から

[†] 関西学院大学大学院 理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University

抽出し、撮影領域と決定する。撮影領域のみを収めた画像を撮影領域画像と呼ぶ。本研究では実空間上に撮影領域が存在すると考える。ユーザと撮影領域の相対位置を求めるために、ドローンの垂直方向の上下移動に基づく距離計測を行う。距離計測の結果から、撮影領域画像に近い構図を取得できる撮影位置を仮定する。底面カメラ画像に PTAM を用いることで機体の位置及び移動量を推定し、撮影位置までドローンを移動させる飛行の指示を行う。距離計測と移動量の推定の処理ではそれぞれにおいて誤差が発生することが予測される。仮定の撮影位置に到着したと判定された後、適切な撮影位置を改めて探索しホバリングを維持するためのビジュアルサーボを行う。撮影領域画像に近い構図が得られたとき正面カメラ画像の静止画保存を実行する。

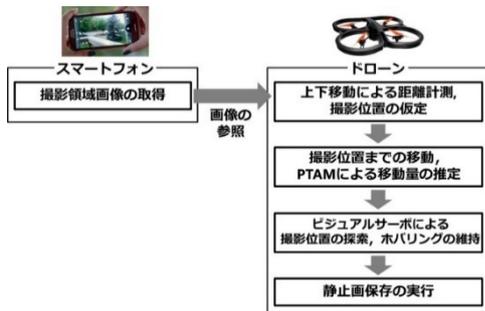


図1 本システムの処理の流れ

4. 上下移動に基づく距離の計測

距離計測の処理の流れを図2に示す。ドローンを垂直方向に上昇させ、事前に設定した二つの高度で正面カメラ画像を静止画保存する。このとき、撮影領域に近い構図を中央に捉えるようにヨー回転を行う。上視点画像、下視点画像、撮影領域画像の間で特徴点マッチングを行い、同調する特徴点の組を求める。計測対象の選択により、マッチングを調べる特徴点の範囲を限定する。上視点画像と下視点画像においてステレオ視を行い、実空間における特徴点の座標を求め、撮影領域までの距離の値とする。距離計測の結果を用いて、撮影領域に近い構図の画像を静止画保存するためにドローンを移動させる撮影位置を仮定する。

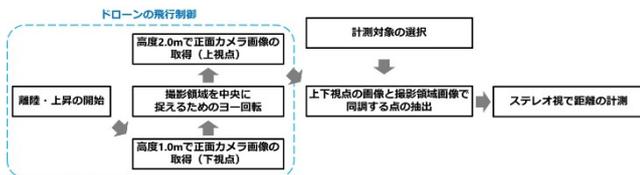


図2 距離計測の処理の流れ

4.1 上下視点のステレオ視

本研究では、撮影領域が実空間にも存在し、その位置は被写体の位置と等しいと考える。被写体の位置を求めるための距離計測に、ドローンの垂直方向の上下移動を利用したステレオ視を用いる。一般的な水平方向ではなく垂直方向のステレオ視を用いる利点は二つある。一つ目は狭い空間で長い基線長を確保できる点である。基線長とは二つの

視点間の距離を指す。長い基線長を用いてステレオ視を行うことで距離計測の精度が向上する。二つ目は水平方向に比べて垂直方向の方がドローンの飛行を高い精度で制御できる点である。ドローンの底面に搭載されている超音波センサーから高度の値を参照することで比較的容易に機体の高度を維持することができる。

距離計測の例を図3に示す。ドローンを垂直方向に上昇させ、事前に設定した二つの高度で停止する。本研究では高度を1.0mと2.0mに設定することでユーザの視野に近い画像を取得する。それぞれの停止時に正面カメラ画像を静止画保存し、下視点画像、上視点画像と決定する。このとき、高度1.0mにてドローンの下視点画像を取得した時点で、撮影領域に近い構図を正面カメラ画像内の水平方向の中央に捉えるようにドローンをヨー回転させる。ステレオ視における各視点の光軸は平行であることが望ましい。そこでドローンに搭載されたジャイロセンサを参照し、ロール角・ピッチ角が0°前後で安定していることと、二つの視点間で近い値を示していることを確認して画像を取得する。上下視点の画像間でORB特徴量を用いた特徴点マッチングを行い、同調する特徴点の組を求める。また、次節で述べる撮影領域画像とのマッチングと計測対象の選択により、任意の被写体に含まれる特徴点の組を抽出する。ステレオ視によって実空間における特徴点の座標を求める。

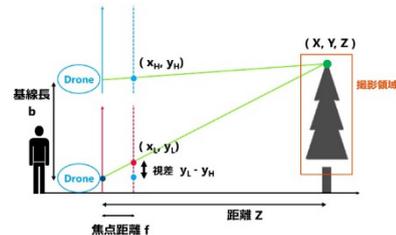


図3 ドローンの上下移動に基づく距離計測

実空間における特徴点の座標を (X, Y, Z) とする。上下視点のステレオ視により Y を式(1)、 Z を式(2)で表すことができる。式中の b は上下視点の高度差である基線長を、 f は正面カメラの焦点距離を示す。 y_L と y_H は下視点画像と上視点画像において特徴点が位置する y 座標の値であり、差分が上下視点の視差を示す。近方の被写体ほど視差が大きく、遠方の物体ほど視差が小さくなる。視差が小さい場合は僅かな誤差が計測結果を大きく変動させるため、視差が10ピクセル以下のときにドローンをさらに1.0m上昇させ、上視点画像と高度・姿勢角の値を更新する。

$$Y = y_L \frac{b}{y_L - y_H} \quad (1)$$

$$Z = f \frac{b}{y_L - y_H} \quad (2)$$

上下移動では水平方向の視差が発生しないため、任意の特徴点の X 座標を求めることができない。そこで、カメラの焦点と任意の特徴点を結ぶ直線がカメラの光軸と角度 θ

で交差することから、式(3)で X を表す。式中の x は各視点画像において特徴点が位置する x 座標の値を示す。

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{x}{f} \\ X = Z \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

4.2 計測対象の選択

実際の環境で本システムを使用した場合、特徴点を持つ複数の被写体がカメラ画像内に混在することで撮影位置の仮定が困難になると考えられる。図4に示すように、画像内にある被写体と等しい数の撮影領域が存在する。奥行きのある視差があるため、これらの撮影領域から取得される画像はそれぞれ異なる。本システムでは、ユーザの求める構図に最も近い画像を取得するための適切な撮影領域の位置及び撮影位置を一意に定める。具体的には、ユーザがタッチ操作で選択した被写体の実空間における位置を適切な撮影領域の位置と考えて、選択された被写体への距離計測を実行する。計測対象の特徴点群を限定することで、任意の撮影領域の位置を求める。

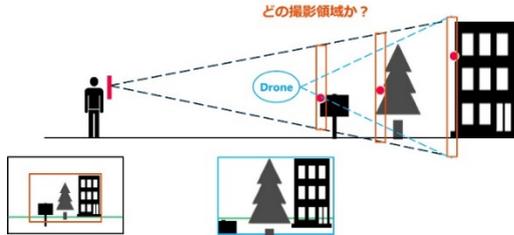


図4 複数の撮影領域の混在

ユーザによる計測対象の選択から距離計測に至るまでの流れを図5に示す。撮影領域画像と各視点画像との間でORB特徴量を用いた特徴点マッチングを行う。ユーザが撮影領域画像上でタッチ操作した座標周辺の特徴点を抽出し、それらに同調する各視点画像内の特徴点を計測候補の点群に追加する(図中①)。上視点画像における計測候補の点群と下視点画像における計測候補の点群との間で、同様に特徴点マッチングを行う(図中②)。以上によりマッチングを確認できた特徴点の組について、4.1節で述べたステレオ視による距離計測を行う。

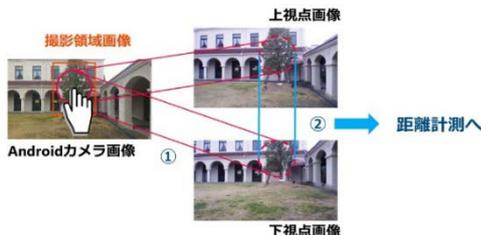


図5 計測対象の選択から距離計測までの流れ

撮影領域画像における特徴点の抽出処理では、ユーザがタッチ操作した座標を中心に探索円を広げる。まず撮影領域画像内の特徴点群について、各視点画像との間で同調した点の位置と総数 C を把握する。次に半径 r ピクセルの探

索円を撮影領域画像上に設定する。 r の初期値は、タッチ座標から撮影領域の外縁までの長さの半分とする。円の内側に含まれる特徴点の数をカウントし、 C の半数に達しなかった場合は r を2ピクセル増加する。円の内側に含まれる特徴点が C の半数に達したとき、または円周が撮影領域の外縁に接したときに、円の拡大を終了する。円内の特徴点と同調する各視点画像の特徴点を計測候補の点群に加える。

計測候補の点群に同調する特徴点の組を上視点画像と下視点画像の間で求め、ステレオ視による距離計測を行う。ドローンが垂直方向に上下移動して画像を取得することから、特徴点の組における水平方向の位置の差に制限を設ける。なお飛行の横滑りによる誤差を許容するため、本研究では取得画像の水平方向サイズの10分の1を閾値に設定し、閾値以上の水平方向の位置の差を示す特徴点の組を除外する。残された組についてステレオ視を行い、得られた値を距離データのセットに保存する。外れ値を取り除くために、距離データのセットから求められる中央値を撮影領域までの距離と推定する。

4.3 撮影位置の仮定

距離計測の結果を用いて撮影位置を仮定する。本研究で使用するドローンは対角画角 92° の広角レンズを正面に備えており、取得画像の縦横比は $9:16$ である。よって垂直画角 θ_v は約 53.86° 、水平画角 θ_h は約 84.13° と算出される。被写体までの距離が Z であるとき、距離 Z における正面カメラの画像取得範囲は式(4)で表される。 W は水平方向の範囲、 H は垂直方向の範囲を示す。本研究では撮影領域が実空間に存在すると考える。正面カメラ画像と撮影領域のサイズ比率を画像取得範囲 W と H に当てはめることで、実空間における撮影領域のサイズ W_A と H_A を求める。また撮影領域の中心の座標を (X_A, Y_A, Z_A) とおき、画像取得範囲 W と H が W_A と H_A に等しくなる撮影位置を求める。ただし撮影領域の縦横比が $9:16$ でない場合は W_A と H_A の一方のみを考慮する。垂直方向のサイズに対する水平方向のサイズの割合が $16/9 = 1.7777\dots$ を越える場合は W_A を、下回る場合は H_A を選択する。撮影位置の座標 (X_s, Y_s, Z_s) は式(5)で表すことができる。

$$\begin{cases} W = 2 \cdot Z \tan\left(\frac{\theta_h}{2}\right) \\ H = 2 \cdot Z \tan\left(\frac{\theta_v}{2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_s = X_A \\ Y_s = Y_A \\ Z_s = \frac{H_A/2}{\tan(\theta_v/2)} \text{ or } \frac{W_A/2}{\tan(\theta_h/2)} \end{cases} \quad (5)$$

5. PTAMに基づく位置と移動量の推定

距離計測によって仮定した撮影位置までドローンを移動させるために、ドローンの位置及び移動量を把握するこ

とで適切な飛行の指示を逐次的に生成する。現在位置から撮影位置までの最短経路を通るように飛行を制御する。

ドローンの位置及び移動量を推定する手法には、カメラ画像を用いる手法、加速度センサとジャイロセンサを用いる手法、GPS (Global Positioning System) を用いる手法の三つが主な候補に挙げられる。本研究はカメラ画像を用いる手法を選択する。Visual SLAM の一種である PTAM (Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces) [5] を利用することで、撮影位置に向かうドローンの底面カメラから得られる地面の映像に基づいて機体の位置・姿勢を把握し、移動量をリアルタイムに推定する。

5.1 ドローンを介した PTAM の実行

PTAM とはマーカレス AR 手法で、単眼カメラで動作する特徴点ベースの Visual SLAM である。マッピング (Mapping) とトラッキング (Tracking) の処理を別スレッドで平行に動作させることでトラッキングのためのパフォーマンスを常に一定以上確保している。FAST 特徴検出を用いて画像中の特徴点を抽出し、異なるフレーム間で対応付けを行う。抽出された特徴点群をもとに三次元の環境地図を構築し、新たな特徴点を検出した場合は環境地図を更新する。環境地図に対するカメラの自己位置・姿勢を推定する。

ドローンの底面カメラを介して PTAM の処理を行う流れを図 6 に示す。処理を開始するとマップの初期化を行い、基準の座標系となる平面の検出と環境地図の作成を行う。マップの初期化にはカメラを平行に移動させて取得した二枚のキーフレームを要するため、ドローンを前方方向にわずかに移動させて、移動の開始と終了時の位置で底面カメラから画像を取得する。ホバリングにより底面カメラが常に地面と平行に対面すると考えられることから、画像中の最も大きな平面を検出する。マップの初期化によって得られた環境地図上の点群をもとに、特徴点の登録・更新とドローンの位置姿勢の推定を行う。仮定の撮影位置を目標値に設定し、現在の位置姿勢と比較する。目標値までドローンを最短経路で移動させるための飛行の指示を行う。また PTAM は、正確な特徴点を検出されるフレームをキーフレームに追加し、既存のキーフレーム間の対応関係を更新することで環境地図を拡張する。ただし新規キーフレームの品質が十分でなければ環境地図の追跡に失敗し、位置姿勢の推定を行うことができない。環境地図の追跡に失敗した場合は、直前の位置座標から求められる移動量を保持したうえで、改めてマップの初期化を行う。

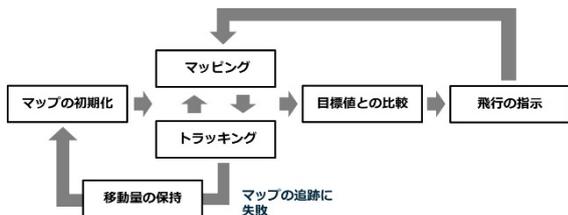


図 6 ドローンの底面カメラを介した PTAM 実行の流れ

5.2 飛行の指示

ドローンへの飛行の指示は、主に前後左右の移動とヨー角の回転である。撮影位置とドローンの位置関係を表した俯瞰を図 7 に示す。左右の移動速度を V_x 、前後の移動速度を V_z とする。高度に関しては超音波センサを参照することで PTAM を用いることなく高精度の制御が可能である。そのため、撮影位置の座標 (X_s, Y_s, Z_s) のうち X_s と Z_s についてドローンの位置座標との一致を確認した後に、ドローンを上下に移動させて Y_s と一致させる。前後左右の移動では、環境地図の追跡の精度を確保するため、目標までの距離に依らず移動速度を 1.0m/s に設定する。また移動中の高度を 1.0m に設定することで特徴点の検出とマッチングの精度を確保する。次章で述べるビジュアルサーボの処理へシームレスに移行するために、移動方向に依らず常に一定のヨー角を維持する。よって、撮影位置までドローンを移動させるための移動方向と移動速度は式(6)で表される。 V_{xz} に 1.0 を代入し、 V_x と V_z を算出する。

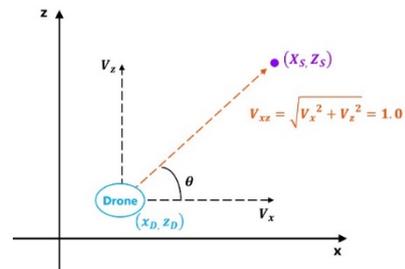


図 7 撮影位置とドローンの位置関係 (俯瞰)

$$\begin{cases} \theta = \text{atan} \left(\frac{Z_s - Z_D}{X_s - x_D} \right) \\ V_x = V_{xz} \cos \theta \\ V_z = V_{xz} \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

6. ビジュアルサーボによる撮影位置の探索

距離計測と移動量の推定の処理では無視できない誤差が発生することが予想される。これにより適切な撮影位置の決定及び撮影位置までの正確な移動を行うことができない。そこで距離計測と移動量の推定の処理で生じる誤差を修正するために、撮影領域に近い構図を収めることのできる適切な撮影位置を改めてビジュアルサーボで探索し、ドローンのホバリングを維持する。しかし、本研究では構図を指定するユーザの立ち位置とドローンの撮影位置とに隔たりがある。両者の取得する写真の構図が完全に一致することはないため、ドローンの撮影位置をビジュアルサーボで探索するにあたり基準となる目標の画像が存在しない。そこで距離計測の実行時にユーザが選択した被写体に着目し、その被写体を基準のマークと捉えた PID 制御によってドローンの移動方向と移動速度を決定する。

6.1 飛行制御への適用

PID 制御とは、P (Proportional : 比例) 動作、I (Integral : 積分) 動作、D (Derivative : 微分) 動作を含むフィードバ

ック制御である。本研究は目標値を満たして静止画を保存することが目的であるためPID制御を実装する。

仮定の撮影位置に到着したと前章の処理で判定された後、PID制御を開始する。PID制御ではドローンの三軸方向の飛行を制御する。正面方向をz軸、右方向をx軸、上方向をy軸と置いた左手直交座標系を図8に示す。マーカとなる特定の被写体を正面カメラ画像から探索し、撮影領域内の被写体との位置座標の差分とサイズ比を計算する。差分の解消とサイズ比の等倍化を行うようなドローンの移動方向と移動速度をPID制御で求める。制御則を式(7)に示す。式中のVは各移動方向における移動速度(m/s)を表す。Aは偏差であり、x軸とy軸方向の制御では位置座標の差分を、z軸方向の制御ではサイズ比を表す。K_p、K_i、K_dは、それぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインを表す。これらのゲインの値には、屋外において撮影位置の探索とホバリングの維持を行うにあたり適する値に調整を施した。

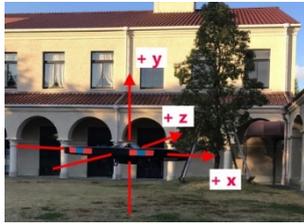


図8 ドローンの左手直交座標系

$$V_{x,y,z} = K_p \times A + K_i \int_0^T A dt - K_d \times \dot{A} \quad (7)$$

カメラ画像中のマーカを基準にして飛行ドローンの位置・姿勢を維持する羽根ら[6]の研究がある。ドローンの底面カメラからマーカを認識し、水平の二軸方向の飛行を制御している。本研究では正面カメラを使用し、マーカに対して垂直の相対距離も考慮した三軸方向の飛行を制御する。また、羽根らは目標値に近い状態を維持するために積分の制御を考慮しないPD制御を実装している。本研究ではPID制御を実装し、撮影領域内の被写体とドローンのカメラ画像中の被写体を一致させるように制御を行う。

6.2 マーカを選択

ユーザとドローンの取得する写真の構図が完全に一致することはないため、ドローンの撮影位置をビジュアルサーボで探索するにあたり基準となる目標の画像が存在しない。そこで距離計測の実行時にユーザが選択した被写体に着目する。選択された被写体は実空間において撮影領域と同じ位置にあり、撮影領域画像を特徴づける画像情報であると考えられる。このことから、その被写体をPID制御における基準のマーカに設定する。マーカ設定の流れを図9に示す。撮影領域画像をドローンの正面カメラ画像と等しいサイズに拡大する。正面カメラ画像と撮影領域画像の縦横比が一致しない場合は、撮影領域画像の不足部分に黒帯を付加することで縦横比を一致させる。距離計測時の探索円を

含む矩形を拡大後の撮影領域画像から抽出し、マーカ画像に設定する。



図9 マーカの設定

6.3 マーカの追跡

正面カメラ画像中のマーカを追跡し、その位置とサイズに従ってドローンの移動方向と移動速度をPID制御で決定する。マーカの追跡と飛行の指示を行う流れを図10に示す。ドローンの正面カメラ画像とマーカ画像との間でORB特徴量を用いた特徴点マッチングを行う。正面カメラ画像に映るマーカとマーカ画像のサイズ比を特徴点の分布から算出する。算出されたサイズ比はドローンと被写体の垂直方向の相対距離に依存するため、z軸方向の制御における偏差とする。サイズ比が1.0から外れた値である場合は式(7)よりV_zを決定する。また、正面カメラ画像内の点群の重心と画像の中心座標との位置の差分をx軸方向とy軸方向の制御における偏差としてV_xとV_yを決定する。サイズ比が1.0に近い値である場合はV_zを0.0と決定する。マーカ画像をテンプレート画像に、正面カメラ画像を被探索画像に設定したテンプレートマッチングによって、拡大後の撮影領域画像と正面カメラ画像に映るマーカの位置座標を比較する。この位置座標の差分をx軸方向とy軸方向の制御における偏差としてV_xとV_yを決定する。サイズ比が1.0に近い値を示し、かつ位置座標の差分が0に近い値を示す場合に正面カメラ画像を静止画保存する。これを本システムにおけるユーザの撮影領域に近い構図の写真撮影とする。

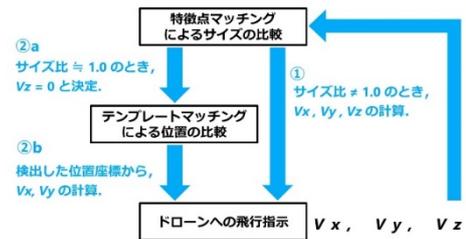


図10 マーカの追跡と飛行の指示

7. 実験

距離計測の精度、移動量の推定の精度、撮影した写真の妥当性を評価する三つの実験を行う。実験環境には、本システムの利用を想定する屋外を設定した。

7.1 実験 I

7.1.1 手法

実験 I では距離計測手法の精度を評価する。被験者はドローンを前方に待機させ、スマートフォンのカメラ画像において撮影領域の選択と計測対象の選択の入力操作を行う。被験者の操作を確認した後、ドローンによる上下移動に基

づく距離計測を行う。被験者の入力操作からドローンによる距離計測の結果が出力されるまでを一回の試行とする。距離計測の結果と、実空間におけるユーザから計測対象までの実距離を比較して、精度を評価する。本実験では9つの試行を行った。各試行における環境と選択した被写体までの距離を図 11 に示す。



図 11 試行番号 1~9

7.1.2 結果

実験 I の結果を表 1 に示す。距離計測結果には、距離データセットから求められる中央値と平均値を記している。多くの試行において中央値の方が実距離に近い値を出力している。本研究では外れ値を取り除く目的で中央値を求めており、これにより距離計測の精度が向上していることがわかる。しかし試行番号 5 の平均値、試行番号 7 の中央値、試行番号 8 の平均値、試行番号 9 の中央値と平均値では実距離と大きく異なる結果が得られた。

表 1 実験 I の結果

試行番号	実距離[m]	下視点の高度[m]	上視点の高度[m]	基線長[m] (高度差)	距離計測結果	
					中央値[m]	平均値[m]
1	5.0	0.97	2.25	1.28	5.7	5.0
2	5.0	0.99	2.02	1.03	8.8	7.7
3	10.0	0.98	2.08	1.10	9.5	8.8
4	10.0	1.01	2.14	1.13	8.5	8.5
5	25.0	1.03	2.06	1.03	26.3	14.1
6	25.0	0.95	2.15	1.20	20.1	19.7
7	25.0	0.95	2.28	1.33	41.7	33.0
8	50.0	1.02	2.60	1.58	48.9	33.5
9	100.0	0.98	2.22	1.24	78.1	75.4

7.2 実験 II

7.2.1 手法

実験 II では移動量の推定の精度を評価する。被験者は離陸開始位置から目標地点までドローンを操縦して移動させる。システムは底面カメラから得られる地面の映像に基づき、飛行中のドローンの位置と移動量を PTAM によって推定する。目標地点に到達したときにドローンの飛行を終了する。終了時点において本システムが推定したドローンの位置と目標値を比較し、精度を評価する。三つの目標地点を表した実験 II の概略図を図 12 に示す。目標地点の座標は、ドローンの離陸開始位置を原点、前後左右方向を x 軸と z 軸においた二次元直交座標系で表される。各座標は

(0.0[m], 5.0[m]), (5.0[m], 0.0[m]), (5.0[m], 5.0[m]) である。本実験では二つの環境で実験を行った。実験を行った環境 1 と 2 を図 13 に示す。

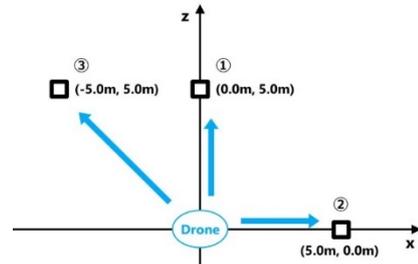


図 12 実験 II の概略図



図 13 実験 II の環境 1~2

7.2.2 結果

実験 II の結果を表 2, 表 3 に示す。推定されたドローンの位置と目標値との差分を本手法における誤差とする。環境 1 では全ての目標地点において大きな誤差が生じた。環境 1 と 2 でいずれも目標値を下に外れた値を推定した。

表 2 実験 II の結果 (環境 1)

目標地点	ドローンの位置		目標値		誤差	
	x 座標[m]	z 座標[m]	x 座標[m]	z 座標[m]	x 座標[m]	z 座標[m]
1	0.6	1.5	0.0	5.0	0.6	3.5
2	1.7	0.3	5.0	0.0	3.3	0.3
3	-1.3	0.8	-5.0	5.0	3.7	4.2

表 3 実験 II の結果 (環境 2)

目標地点	ドローンの位置		目標値		誤差	
	x 座標[m]	z 座標[m]	x 座標[m]	z 座標[m]	x 座標[m]	z 座標[m]
1	0.5	4.3	0.0	5.0	0.5	0.7
2	4.0	-0.6	5.0	0.0	1.0	0.6
3	-3.6	3.9	-5.0	5.0	1.4	1.1

7.3 実験 III

7.3.1 手法

実験 III では撮影した写真の妥当性を評価する。被験者が選択した撮影領域と被写体に基づき、ビジュアルサーボによる撮影位置の探索とホバリングの維持を行う。この処理は、仮定の撮影位置の付近にドローンを移動させた状態から開始する。仮定の撮影位置よりも被写体に近い開始位置、遠い開始位置の二つのケースで実験を行う。最後に静止画保存されたドローンの正面カメラ画像と撮影領域画像との相違を検証する。実験 III において撮影を試みた 4 つの環境を図 14 に示す。本研究ではユーザの立ち位置とドローンの撮影位置に隔りがあるため、撮影領域画像と完全に一致する構図の画像をドローンが取得することはできない。

そのため、撮影した写真の妥当性についてアンケートを集計し主観的な評価を行う。アンケートでは撮影領域画像、マーカ画像、静止画保存画像を提示し、二つの設問と自由記述に答えてもらう。設問1は「静止画保存画像と撮影領域画像の構図は似ている」、設問2は「静止画保存画像と撮影領域画像で、被写体の位置・サイズは同じだ」であり、リッカート尺度を用いて-2 から+2 の五段階で評価する。



図14 実験Ⅲの環境1~4

7.3.2 結果

実験Ⅲの結果のうち、静止画保存画像を図15に、アンケート結果を表4と表5に示す。アンケートでは11名の回答を得た。環境1の近い開始位置と環境2の遠い開始位置を除き、撮影領域に近い構図の画像を取得することができた。また環境4の遠い開始位置を除き、被験者が選択した通りの位置とサイズで被写体を映すことができた。



図15 実験Ⅲの静止画保存画像の結果

表4 実験Ⅲのアンケート結果 (設問1)

撮影画像	平均値	標準偏差
環境1 (近い開始位置)	-0.3	1.1
環境1 (遠い開始位置)	1.2	0.9
環境2 (近い開始位置)	0.2	1.3
環境2 (遠い開始位置)	-0.1	1.3
環境3 (近い開始位置)	0.9	1.0
環境3 (遠い開始位置)	0.6	0.9
環境4 (近い開始位置)	0.2	0.9
環境4 (遠い開始位置)	0.1	0.1

表5 実験Ⅲのアンケート結果 (設問2)

撮影画像	平均値	標準偏差
環境1 (近い開始位置)	1.0	0.4
環境1 (遠い開始位置)	0.6	1.1
環境2 (近い開始位置)	0.8	0.7
環境2 (遠い開始位置)	0.5	1.0
環境3 (近い開始位置)	0.1	1.0
環境3 (遠い開始位置)	1.2	0.6
環境4 (近い開始位置)	0.3	1.1
環境4 (遠い開始位置)	-0.3	0.9

7.4 考察

実験Ⅰでは距離計測手法の精度を評価した。試行番号5における距離計測を図16に示す。25.0m先の被写体に対して中央値で26.3mと推定する結果が得られた。本研究では撮影領域に近い構図を中央に捉えるようにドローンのヨー回転を行う処理を実装しているが、計測対象の被写体が撮影領域内の左右端に位置する場合がある。試行番号5では正面カメラ画像内の右端に位置する樹木に対して距離を計測し、実距離に近い値が得られた。このことから、本研究はユーザの選択する撮影領域の位置と被写体の位置に制限されない距離計測が可能であると考えられる。



図16 試行番号5における距離計測

試行番号7における距離計測を図17に示す。25.0m先の被写体に対して中央値で41.7mと推定され、実距離と大きく異なる結果が得られた。電灯を計測対象に選択したが、上下の視点画像の電灯から同調する特徴点を検出できなかった。本研究では特徴点検マッチングを用いて距離計測を行うため、画像領域が狭く、かつ周囲との画素の変化が少ない被写体は計測対象に適していない。そこで、特徴点検出器の再設定に加えて特徴点の移動の軌跡(オプティカルフロー)を推定することで、検出数の増加と正しいマッチングの抽出との両立を目指す。下視点画像の取得時から上視点画像の取得時までのカメラフレームにおいて、時系列に沿った特徴点のトラッキングを行う。



図17 試行番号7における距離計測

実験Ⅰの試行全体の精度を向上させるための改善策に、多視点のステレオ視と、エピポーラ幾何を用いた三次元構造の復元が考えられる。より多くの視点で画像を取得することでステレオ視における制約条件を増やすことができる。ステレオ視における二つの視点の光軸は平行であることが望ましく、本研究では視点間で姿勢角が近い値を示していることを確認して画像を取得しているが、姿勢角の完全な一致を満たすことはできない。そこで視点間の位置姿勢の関係に基づき、各視点の対応関係を表すエピポーラ方程式を求め、シーン内の三次元構造を復元する。

実験Ⅱでは移動量の推定の精度を評価した。環境1では

全ての目標地点においてドローンが開始位置からあまり移動していないと推定され、大きな誤差が生じた。原因は、底面カメラの映す地面が一様なテクスチャのパターンを有するためと考えられる。図 18 に環境 1 の地面を示す。カメラの平行移動後も一様なテクスチャが広がる面では、異なる位置に似た構造の特徴点群を発見してしまい、特徴点群の同一判定に誤りが生じる。そこでドローンの移動方向と移動速度に基づいて PTAM のマッピングに制約を加える手法を検討している。現状で自動的に行われているキーフレーム追加の処理について、移動方向と移動速度から推定される対応点を含むキーフレームのみを追加するよう改良する。ただし機体の加速度センサとジャイロセンサのセンシングに含まれるノイズを考慮する必要がある。



図 18 実験 II の環境 1 における地面

環境 2 では環境 1 に比べて少ない誤差の移動量を推定した。一つの目標地点への移動につき二、三回程度の再度のマップの初期化が行われた。初期化中の移動量が正しく加算されなかったため、目標値から下に外れた移動量を推定したと考えられる。

実験 III では撮影した写真の妥当性を評価した。環境 4 では 50.0m 先にある校舎入り口を被写体を選択しているため、ユーザの見る撮影領域画像とドローンの取得する正面カメラ画像とで奥行き視差が大きい。両画像の差異を図 19 に示す。撮影領域画像内の左に映る樹木が静止画保存画像には映っていない。しかし本研究では奥行き視差を許容したうえで、撮影領域に近い構図の画像を取得することを目的としている。選択された被写体である校舎の入り口に着目し、ビジュアルサーボによる撮影位置の探索とホバリングの維持、静止画保存を行った。



図 19 奥行き視差による撮影領域画像と静止画保存画像との差異

環境 1 の近い開始位置の静止画保存画像と撮影領域画像とを図 20 に示す。機体のヨー角の変化による構図のずれを確認できる。自由記述欄においても「少しでも角度が違えば撮りたい構図とは完全に異なるように見える」等、撮影時の機体の姿勢への懸念が得られた。本研究では撮影領

域と平行に対面するヨー角を維持するようにドローンの飛行を制御しているが、姿勢角を推定するためのジャイロセンサには処理時間の増加に伴って誤差が蓄積する。殊に環境 1 では被写体である壁とドローンとの相対距離が近いこと、風の煽りを比較的強く受けたと考えられる。画像内の水平方向のエッジを検出することで、画像を取得したカメラ間におけるヨー角のずれを検出する手法を検討している。



図 20 環境 1 の近い開始位置の静止画保存画像と撮影領域画像

8. まとめと今後の展望

ユーザがスマートフォンのカメラ画像を通して指定した構図（撮影領域）を、自律飛行するカメラ搭載ドローンによって写真撮影するシステムを提案・実装した。現状では距離計測によって仮定した撮影位置が環境中の他の物体と衝突を起こすケースを考慮していない。撮影領域画像に映る全ての被写体を対象とした距離計測を行うことで衝突の問題を事前に把握し、撮影位置の再設定を行う必要がある。将来的には被写体の位置・形状をより詳細に把握することで、ユーザの立ち位置からは視認できない被写体の側面・背面に回り込んだ撮影の実現が考えられる。

参考文献

- [1] 株式会社 CSS 技術開発, “UAV 航空写真測量,” <http://www.css24.jp/service/syasin.htm>, 2017. (2019/02/21 アクセス).
- [2] Keita Higuchi, Yoshio Ishiguro, and Jun Rekimoto, “Flying eyes: free-space content creation using autonomous aerial vehicles,” CHI’11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.561-570, 2011.
- [3] Morgan Quigley, Michael A. Goodrich, and Randal W. Beard, “Semiautonomous human-UAV interfaces for fixed-wing mini-UAVs,” International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp.2457-2462, 2005.
- [4] Shunsuke Sugawara, Yasuyuki Kono, “Photographing System Employing a Shoulder-mounted PTZ Camera for Capturing the Composition Designated by the User’s Hand Gesture,” 14th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE2017), pp. 588-600, 2017.
- [5] Georg Klein, David Murray, “Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces,” Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’07), pp. 225-234, 2007.
- [6] 羽根嘉宣, 武田敦志, “カメラ画像に基づいた AR.Drone の姿勢制御手法の開発,” 情報処理学会東北支部研究報告, vol. 2014, 2015.