

非 GPS 環境におけるドローン自律飛行システムの構築

Evaluation of position control for drone with suspended load system

システム工学群

知能メカトロダイナミクス研究室 1180044 金川 駿一郎

1 緒言

近年、搬送や撮影の分野においてドローンの活用が広がってきている。中でも搬送に活用する場合、機体固定と吊り下げの2つのパターンが考えられる。吊り下げの場合、細長い形状の物体の搬送や、山間部の森林地帯のような離着陸が難しい場所において有利な場合がある。一方で、吊り下げ物体の振動によって飛行の安定性が失われる可能性がある。

我々は、ドローンによる吊り下げ搬送時において安全な搬送方法を構築することを目指している。過去の研究でシングルロータのヘリコプタの研究を対象として遅延フィードバックを用いた吊り下げ物体の振動抑制制御について報告している⁽¹⁾。これに対して、マルチロータの場合は、機体の形状が横長で姿勢角制御を回転数制御で行うためレスポンスが悪く、大きく傾けること自体が難しい。そのため吊り下げ物体の振動抑制を行う場合は、機体のロールとピッチに関する回転運動ではなく、水平方向の並進運動が支配的となる。そのため、マルチロータの並進運動の特性を明らかにする実験を行う必要がある。ドローンの特性を把握するためには、正確な位置、姿勢を計測する必要がある。姿勢に関しては機体に内蔵される慣性センサに基づいてほぼ正確に推定できるが、位置情報を計測する GPS はサンプリング周波数が低く、計測精度も低いいため正確な計測が難しい。そこで本研究では位置計測をモーションキャプチャシステム(以下 MC)に置き換えて機体の位置を計測行う。機体を MC に置き換えて飛行させる環境と構築を目指す。

機体の位置計測を GPS から MC に置き換えるためには、MC と機体の通信を行う必要がある。しかし、MC はイーサネット、機体はシリアルで通信を行うため直接通信させることは難しい。そこで MC と機体の間に PC を経由させ通信を可能にした。そのための通信環境の構築と屋内の計測について報告する。



Fig. 1 Figure of drone..

2 ドローンの仕様とモデル

2.1 使用した機体の概要

本研究では、エンルート社の ZionPG390 に対してパラメータ同定実験を行う。PG390 を図 1 に示す。またこのドローンの大きさは 549×549×149mm、モーター対角軸間は 390mm、標準飛行時重量は 1.38kg (バッテリー込み)、プロペラ径は 9.45 インチ、飛行時間は約 10 分である。使用しているフライトコントローラーは Pixhawk、制御プログラムは ArduPilot を使用している。

2.2 機体の運動方程式

ドローンのモデルを剛体の運動方程式から求める⁽²⁾⁽³⁾。3次元の剛体の運動方程式はニュートンの運動方程式により式(1)で表現できる。

$$m\dot{\mathbf{V}} + \boldsymbol{\Omega} \times m\mathbf{V} = \mathbf{F}^b \quad (1)$$

$$\mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Gamma}^b$$

ここで m を質量、 \mathbf{J} は慣性行列、 \mathbf{F}^b は外力ベクトル、 $\boldsymbol{\Gamma}^b$ はトルクベクトル、 \mathbf{V} は機体固定座標系における速度、 $\boldsymbol{\Omega}$ は角速度である。

さらに座標系を考慮し、外力ベクトルやトルク入力を考慮し変形させると式(2)になる。

$$m\dot{\mathbf{V}} = u\mathbf{R}\mathbf{e}_3^i - m\mathbf{g}\mathbf{e}_3^i \quad (2)$$

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\tau}$$

u は各プロペラの推力の合計、 \mathbf{R} はオイラー角 $\boldsymbol{\eta}$ の回転行列、 \mathbf{e} は絶対座標系の各軸の単位ベクトル、 $\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})$ は慣性行列、 $\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})$ はジャイロモーメント項を含むコリオリ力項、 $\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{\eta})$ はオイラーマトリクス $\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{\eta})$ の逆行列、 $\boldsymbol{\tau}$ は各軸プロペラの反力トルクの入力である。

ここで、吊り下げるケーブルの始点を機体の重心位置と仮定した場合、式(2)にかかる吊り下げ物体による外力は、ケーブルの張力とおくことができる。よって式(2)における慣性行列などの詳細なパラメータを決めることで、吊り下げ物体を含むモデルを構築できる。

2.3 飛行の制御

本研究で使用した機体は、オープンソースで提供されている ArduPilot を使用して制御する。このツールでは、図 2 に示すように機体の姿勢制御をインナーループ、位置制御をアウターループとして制御している。姿勢制御では、フィードバック変数として慣性センサから得られる姿勢角、角速度を用いる。姿勢制御系のインナーループとして姿勢に関する角速度を PID 制御し、アウターループとして参照姿勢角との誤差を比例制御した参照角速度を与える。位置制御では、フィードバック変数として GPS から得られる機体の位置情報を用いる。位置制御系では、姿勢角制御のアウターループとして参照位置情報からの誤差を制御する。使用した機体は、サンプリング周波数 100Hz で制御し、慣性センサとして MPU6000、GPS として Ublox 社製 LEA-6H (5Hz) を使用している。

本研究では、ドローンの特に並進運動の特性を明らかにする必要がある。しかし、機体の位置を GPS で計測した場合、精度とサンプリング周波数が不十分であるため、並進運動の

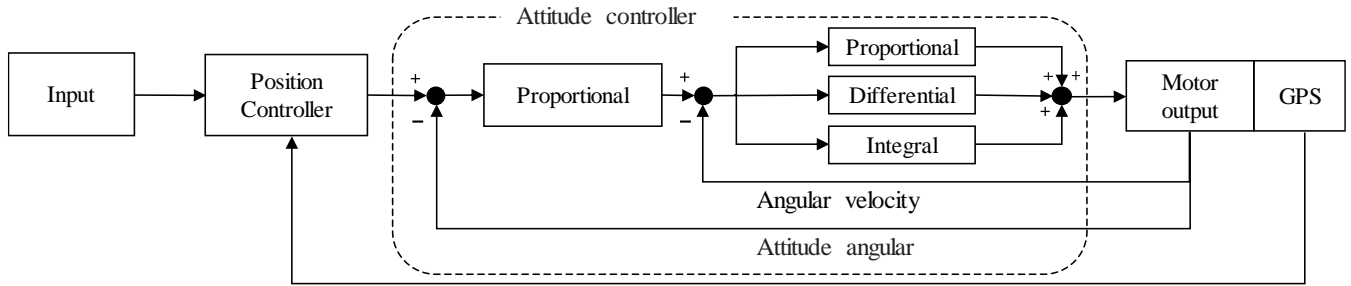


Fig. 2 Drone flying system diagram.

特性が精度良く得られない。そこで、GPSの代わりにMCを用いて並進運動の計測を行う。MCを用いた計測は屋外では行えないため、屋内で特性同定実験を行う。しかし屋内ではGPSを用いた計測が難しいため、GPSを用いた位置制御系が構築できない。そこで、位置制御で用いるフィードバック変数として、MCで計測した値をリアルタイムで機体に送信する。その詳細については、3章で説明する。

3 MCシステム内での自律飛行システムの構築

機体の並進運動の特性をMCを使用して計測する。ここでは、位置制御系のフィードバック変数としてGPSの代わりにMCで計測した位置情報を機体に送信するシステム構築について説明をする。

MC (Motion Analysis 社製) は、専用ソフトをインストールしたPCとカメラで1セットである。使用しているソフトはCortex(Ver.5.5.0)、カメラを12台使用する。MCは複数のカメラからマーカを撮影することでマーカの位置座標をファイルに出力できる装置である。MCのサンプリング周波数は、100Hzとする。

次に、MCで計測した位置情報を機体に送信する方法について説明する。リアルタイムで送信するためにMCのストリーミング機能を使用する。ストリーミング機能とは、計測した位置情報をイーサネット経由で指定したPCへリアルタイムに送信する機能である。そのため、情報を受けるPC(PC2)を別に用意し、専用ソフトがインストールされたPC(PC1)から位置情報を受けるシステムを構築した。さらに、PC2から機体へ位置情報を送るために、PC2と機体をBluetoothで接続し、シリアル通信を行う。このシステムの概略図を図3に表す。これによって、MCからの位置情報に基づく機体の位置制御系が構築できる。

4 システム同定の準備

機体の特性を調べるためには、機体の質量 m 、重心慣性モーメント J が必要である。機体の慣性モーメントは、振り子実験から固有角振動数を求めることで導出できる。固有角振動数の導出に必要な振り子のモデルの運動方程式は式(3)になる。

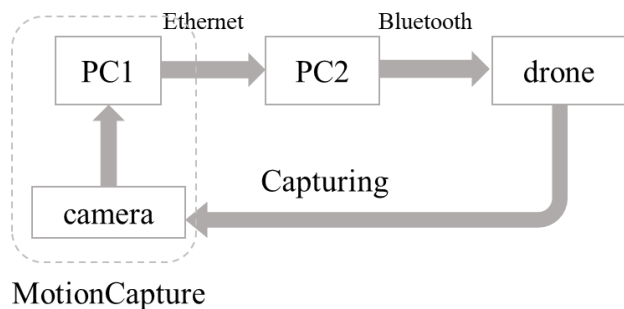


Fig. 3 MC System diagram.

Table 1 Moment of inertia.

	First	second	third	average
x axis	0.112	0.133	0.123	0.123
y axis	0.099	0.119	0.105	0.108
z axis	0.0787			0.0787

(kgm²)

$$(J + m(l + l_0)^2) \ddot{\theta} = -mg(l + l_0)\theta \quad (3)$$

ここで、 J は慣性モーメント、 m は機体の質量、 l はケーブル長、 l_0 はケーブル始点から重心位置の距離である。式(3)より微分方程式を θ について解き、固有角振動数 ω_n を導出する。また、固有角振動数を周期 T に置き換えると式(4)になる。

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{mg(l + l_0)}{J + m(l + l_0)^2}} \quad (4)$$

式(4)より、周期と重心位置を計測することで慣性モーメントを導出することができる。そこで機体を用いて慣性モーメントの導出を行った。

振り子実験を行い、慣性モーメントの導出を行った。周期はMCを使用して計測を行い、質量と重心位置は床反力計を使用して計測を行う。MCのマーカをケーブル始点に取り付け計測を行った。機体の吊り下げ位置を機体フレームの中間とし、ケーブル長1mで周期の計測を行った。導出した慣性モーメントを表1に示す。計測した重心位置は、原点をドローンの前方左下の角としたとき、273×281×103mmであった。Z軸については、機体が回転し正確な周期が計測できず、計測をしていない。

5 結言

本研究の最終目標である、作成したモデルから吊り下げ物体の制振方法を確立するための第一段階として、ドローンの吊り下げモデルの作成に必要な屋内でのパラメータ同定実験のための環境構築を行った。目標としている制振方法が確立できれば、ドローンの搬送時に安全性の向上や時間の短縮が可能になると考えられる。

文献

- (1) 園部元康, 三輪昌史, 日野順市, “小型ヘリコプタにおける吊り下げ物体の簡易振動制御に関する研究 (ホバリング時の振動制御の実験的検討)”, 日本機械学会論文集C編, 78巻 (2012), 789号, p. 1460-1469.
- (2) 野波健蔵, “小型無人航空機の厳密・簡易なモデリングとモデルベース制御”, 計測と制御, Vol56, No.1 (2017), pp. 2-9.
- (3) K.Nonami, F.Kendoul, W.Wan, S.Suzuki, and D.Nakazawa, *Autonomous Flying Robots* Springer(2010) pp. 164-168.