

ドローン(クアドコプタ)の開発の話

佐藤 圭祐
富山高等専門学校
電気制御システム工学科

自己紹介

- 1962年 八尾町生まれ
- 1983年 富山工業高等専門学校 電気工学科卒業
- 1986年 東京大学工学部原子力工学科卒業
- 1987年 東京大学大学院工学系研究科 原子力工学専門課程修士課程
- 1987年 東京大学工学部助手
- 1994年 博士(工学)東京大学
- 1995年 富山工業高等専門学校 電気工学科 助教授
- 2008年 富山工業高等専門学校 電気工学科 教授
- 2009年 富山高等専門学校 電気制御システム工学科 教授



第3種電気主任技術者
第2級アマチュア無線技士など

マルチコプタの概要と構造

市販されているマルチコプタ

マルチコプターを取り巻く最近の状況

ドローンとは無人飛行機の総称

複数の回転翼をもつヘリコプターをマルチコプタと呼ぶ
クアドコプタ, ヘキサコプタ, オクトコプタなど

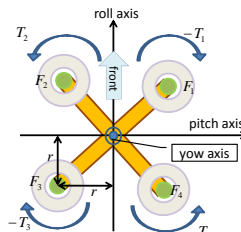


マルチコプタは、機械的な構造が単純、故障が少ない、メンテナンスが容易、などの理由で急速に普及した。特にジャイロセンサなどの小型化により玩具として急速に性能が向上していった。従来のヘリコプタのようなノウハウがいらなかったため、中国メーカーがどんどん参入し、お互い切磋琢磨しつつ低価格市場を形成していった。

現在、玩具用の小型機種は中国メーカーが主流、カメラや測量装置を搭載できる中型、大型ではカナダ、ドイツなどのメーカーが主流となっている。最近、日本の企業グループが参入した。ドローン技術としてはYAMAHAが高い技術を持っているが、残念ながらマルチコプター分野へは参入していない。

一方でアマチュアが制作した制御ソフトウェアをもとに開発が進んでいる流れもある。3DRobotics社が開発したSOLOはArdupilotというフリーソフトをベースとして開発されている。

クアドコプタの飛行原理



Equation of motion for Vertical and each axis

- $F_1 \sim F_4$: Lifting force by each Propeller
- $T_1 \sim T_4$: Reaction force by each Propeller
- $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = ma_v$ Vertical direction
- $(F_1 - F_2 - F_3 + F_4) \cdot r = I_{roll} \cdot \ddot{\theta}_{roll}$ roll axis
- $(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \cdot r = I_{pitch} \cdot \ddot{\theta}_{pitch}$ Pitch axis
- $-T_1 + T_2 - T_3 + T_4 = I_{yaw} \cdot \ddot{\theta}_{yaw}$ Yaw axis

We assume that Torque due to the reaction force be proportional to the thrust of each propeller. That is, we assume $F_i = kT_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), the equation of motion of the yaw axis is as follows.

$$-kF_1 + kF_2 - kF_3 + kF_4 = I_{yaw} \cdot \ddot{\theta}_{yaw}$$

$$\begin{pmatrix} a_v \\ \ddot{\theta}_{roll} \\ \ddot{\theta}_{pitch} \\ \ddot{\theta}_{yaw} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{I_{roll}}{r} & -\frac{I_{roll}}{r} & \frac{I_{roll}}{r} & -\frac{I_{roll}}{r} \\ \frac{I_{pitch}}{r} & \frac{I_{pitch}}{r} & -\frac{I_{pitch}}{r} & -\frac{I_{pitch}}{r} \\ I_{yaw} & I_{yaw} & -I_{yaw} & I_{yaw} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Inverse matrix}} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{m}{4} & \frac{I_{roll}}{8r} & \frac{I_{pitch}}{8r} & -\frac{I_{yaw}}{4k} \\ \frac{m}{4} & -\frac{I_{roll}}{8r} & \frac{I_{pitch}}{8r} & \frac{I_{yaw}}{4k} \\ \frac{m}{4} & \frac{I_{roll}}{8r} & -\frac{I_{pitch}}{8r} & \frac{I_{yaw}}{4k} \\ \frac{m}{4} & -\frac{I_{roll}}{8r} & -\frac{I_{pitch}}{8r} & -\frac{I_{yaw}}{4k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_v \\ \ddot{\theta}_{roll} \\ \ddot{\theta}_{pitch} \\ \ddot{\theta}_{yaw} \end{pmatrix}$$

プロペラの推力を算出する式

Flight principle of Quadcopter(2)

機体を横へ傾けることにより、横方向の推力を得る。

$$T_{roll} = I_{roll} \ddot{\theta}_{roll} = ((F_1 + F_4) - (F_2 + F_3)) \cdot r$$

$$T_{pitch} = I_{pitch} \ddot{\theta}_{pitch} = ((F_1 + F_4) - (F_2 + F_3)) \cdot r$$

$$F_y = m \ddot{y} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \theta_{roll}$$

$$F_x = m \ddot{x} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \theta_{pitch}$$

水平方向の運動方程式

互いに逆方向に回っているローターの組(T1,T3)と(T2,T4)の回転数を変えることにより、反力によりYaw軸方向の機体の方向を変える

プロペラの回転数を変えることにより姿勢を制御するため、高精度で制御する必要がある。したがって、エンジンでプロペラを回転させる方法は向いていない。エンジンを扱う場合にはヘリコプタのように、プロペラに可変ピッチ機構が必要となる。

標準的なマルチコプタの構成

機体フレーム

高機能な外界センサ (カメラ, 超音波センサ等)

撮影用カメラ, 測定器など

機体姿勢制御装置(IMU)

安定飛行のためのセンサー群

- ・加速度センサ (重力加速度から機体の姿勢を測定する)
- ・ジャイロスコプ (角速度から機体の姿勢を測定する)
- ・気圧センサ (機体の高度を測定する)

操縦装置

FPV装置

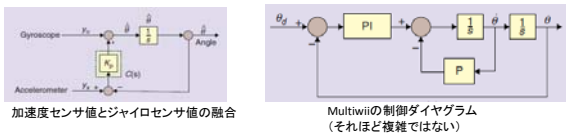
機体から送られた画像により操縦する

ラジコン送受信機

機体の姿勢制御

マルチコプタの姿勢を見ながら、操縦者(人間)がバランスを取ることは困難である。したがってジャイロセンサ、加速度センサを使用して、姿勢の自動制御を行う。

- ・ **加速度センサ**は主として重力加速度を検出し、機体の下方向を検出するために用いる。しかしセンサ値のノイズやドリフトが大きく、加速度センサ単独で重力方向を検出することは困難である。
- ・ **ジャイロセンサ**は機体の3軸に沿った角速度を検出できる。角速度を積分することにより、角度を得ることができるが、絶対値はわからない。
- ・ この二つのセンサの信号を融合して、機体の姿勢を検出する。



自分で制御系を設計する必要はない。

マルチコプターの位置制御

屋外ではGNSS(GPSやGLONASSなど)を用いてロボットの位置を測定することができる。測定された位置情報を用いて、「位置ホールド機能」、「ゴーホーム機能」、「ミッション機能」が実現される。

- ・ **位置ホールド機能**: この機能を有効にすると、ドローンは自動的にその位置にとどまるように制御される。
- ・ **ゴーホーム機能**: この機能を有効にすると、最初にモータが回転を始めた地点の上空に戻ってくる。自動的に着陸をすることができるものもある。
- ・ **ミッション機能**: あらかじめ飛行させたい経路の経路点の座標を入力しておいたうえでこの機能を有効にすると、経路点を順番に通過して元の位置に戻ってくる。



ミッション機能
EZ-GUIを用いた飛行経路の設定

高度制御と方向制御

マルチコプタの高度はGPSの高度情報を用いて制御することも可能だが、精度がよくないので、**気圧センサ**を主として用いることが多い。気圧センサは高性能化が進んでおり、最新のものでは10センチメートル程度の精度で高さを測定できる。ただし、天候の変動により、同じ高さでも気圧はゆっくりと変化するので、GPSの高度情報により補正した方がよい。

磁気方位センサによりマルチコプタがどの方向を向いても、操縦者のスティック操作の方向と期待が移動する方向を一致させる機能(ヘッドロック機能)を実現することができる。

制御装置(フライトコントローラー)

マルチコプタの機体とは別に、**制御装置単体**で手に入れることもできる。制御装置内にはIMU、GPS、各種通信装置、その他のセンサなどが組み込まれている。

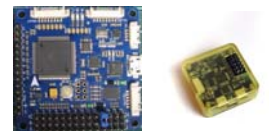
自分で機体を組み立てて、これらの制御装置を取り付けて飛ばすことも可能。

○オープンソース、ハードウェア

- ・ Multiwii : <http://www.multiwii.com/>
- ・ Arducopter : <http://copter.ardupilot.com/>
- ・ NAZE32
- ・ OpenPilot(CC3D)

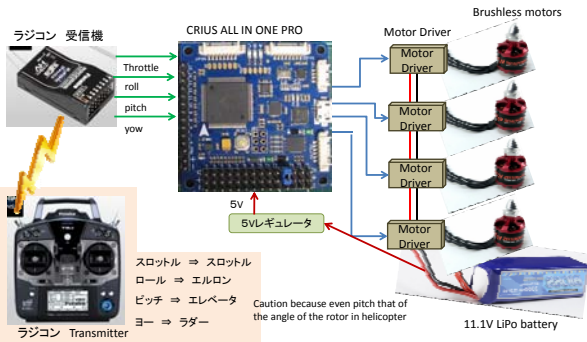
○プロプライエタリ製品

- ・ DJI NAZA-M



Multiwiiを使った場合の周辺との接続

- multiwii is a generic term for a computer and software for controlling the quad Copter.
- MultiWii seems originally began to develop in the process of self-made the Wii Nunchuck.
- Since you are publishing a specification may be to install the software by creating a hardware yourself.
- As the free control system, there are the Arducopter (APM), there is PX4. These became a project called Dronecode to integrate recently. <https://www.dronecode.org/>



カメラの取付

空撮を行う場合には、ジンバルを取り付け、カメラへ振動が伝わらないようにする。ジンバルには加速度センサやジャイロセンサを用いてカメラの方向が常に一定方向を持つように制御する機能がある。

撮影用カメラの機能

- 堅牢であること
- 高画質であること(4K画像が標準)
- 軽量であること
- WiFiなどで画像を伝送できること

ジンバルの機能

- 機体の振動をカメラに伝えないこと
- 機体姿勢変化を検知し、カメラを常に一定方向に向けること
- 操縦者からの指令によりカメラの方向を変えることができること
- 軽量であること

下方を撮影することが多いため、カメラは通常機体の下側に取り付けられる。カメラの向きによっては、機体の脚が映り込んでしまうため、中型以上の機体では脚を引き上げるタイプが多い。



佐藤研究室で製作したマルチコプタ

障害物回避、環境マッピング、制御系の設計などの研究を行っています。



マルチコプターの利用

そもそも、どのぐらいの性能なのか。

- 運動能力 - 飛行範囲、有視界飛行、FPV飛行、自律飛行
- 飛行時間 - バッテリー、ペイロード依存だが、10分から1時間
- 操作性 - ユーザーインターフェース、センサ技術

物資の搬送

- 物流用途 (Amazon宅配便)
- 緊急物資搬送
- 有人飛行

精密農業 - 農業製品のブランド向上

測量、インフラ点検

マルチコプタの性能



DJI Phantom2による1500m上空からの空撮



ドローンレーシング: 小型クアドコプターによるレース。FPVにより操縦する。最高速度は90km/hぐらい

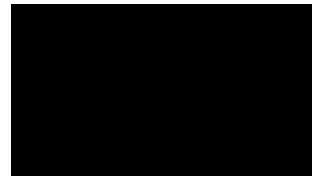


精密な制御のデモンストレーション (TEDにおける講演): 位置の測定は外部カメラを使用している。

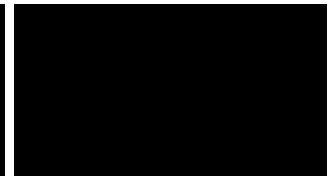
物資の運搬

マルチコプタは有翼の飛行機に比べ、エネルギー効率が悪く、重量物を遠くへ運ぶことには向かないと考えられる。

しかし、垂直に離着陸できることから、緊急を要する用途には適用可能かもしれない。



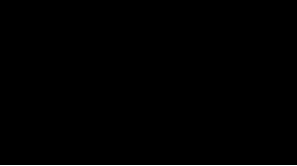
AMAZONが計画している商品配送システム



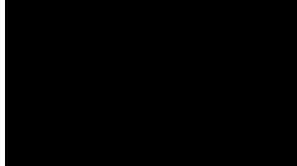
AED緊急配送システムの概念

有人飛行

人間を運搬することにはあまり向かないと思われるが、プロペラが一つ壊れても致命的な事故とならない点で意味があるかもしれない。ビデオはクラウドファンディングで資金を集めたvolocopter



上: 電動有人ヘリコプタ1号 e-volo の初飛行(2011)
下: 集めた資金で作った volocopter VC200(2013)



上: 屋外における初飛行の様子 (2015)

簡単に分解することができる。プロペラ部分は同じパーツ6組からなっている。つまりヘキサコプタの変形であることがわかる



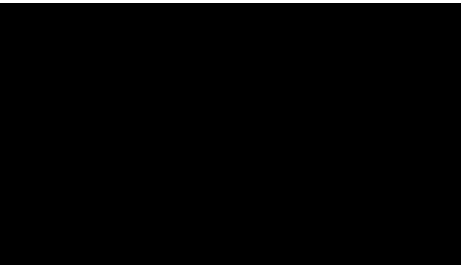
中国人の挑戦心は見習わなくてはならない



精密農業への応用

精密農業とは、「複雑で多様なばらつきのある農場に対し、事実の記録に基づき**きめ細かなばらつき管理**をして、地力維持や収量と品質の向上および環境負荷軽減などを総合的に達成しようという農場管理とその戦略」である。(農林水産技術会議2008年)

ドローンを用いることで農場の細部に至る状況把握が可能となる



NDVI: 植物からの反射光の内、**赤外線**の量をIR、**可視光(赤)**の量をRで表すと

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$
 で表され、値が大きいほど**植生が濃い**。

従来はランドサットなどの人工衛星からの画像を基に推定していた

ドローンを用いて赤外線画像から圃場のNDVIを測定し、植物の生育状況を正確に計測した例。

地形を測定する

近年、3次元測距センサの低価格化や、画像処理による3次元形状の復元アルゴリズムが開発により、ドローンを用いた地形形状の測量が行われている。



ドローン規制法について

飛行区域の制限

対象となる無人航空機は、「飛行機、回転翼航空機、滑空機、飛行船であって構造上人が乗ることができないもののうち、遠隔操作又は自動操縦により飛行させることができるもの(200g未満の重量(機体本体の重量とバッテリーの重量の合計)のものを除く)」(航空法)

飛行させる10日前(土日祝日等を除く。)までに、国土交通省又は各空港事務所に申請書を提出(富山の場合には、現在のところ、小松空港へ提出)

(A) 地表又は水面から**150m以上の高さ**の空域

(B) **空港周辺の空域** 空港やヘリポート等の周辺に設定されている進入表面、転移表面若しくは水平表面又は延長進入表面、円錐表面若しくは外側水平表面の上空の空域(富山空港の場合は半径6キロメートルの地域)

(C) **人口集中地区の上空**

平成22年の国勢調査の結果による人口集中地区の上空

- 申請代行業者もある。
- また申請は現在書類を提出する形だが、**ホームページによる申請**ももうすぐ始まるはず



ドローンによる飛行の制限について



ドローン専用飛行支援地図サービス <http://uas-japan.org/mapservice/>
飛行申請サポート準備中

最後に

- マルチコプタを製作することは難しくない。制御理論を知らなくても、自分の目的に合ったマルチコプタを作り上げることができる。
- 現在、マルチコプタの活用方法について様々な分野で実証が行われている。応用分野としては、上空からの撮影を利用するものが多いが、物流に利用しようとする実験も行われている。
- ドローン規制法により、飛行させるためには申請が必要になったが、申請の代行業者やホームページ申請などの準備が整いつつあり、それほど大きな障害にはならないと思われる。