

目次

第 1 章	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	4
第 2 章	制御対象とシステム	7
2.1	緒言	7
2.2	制御対象	7
2.3	制御システム	7
2.3.1	マイクロコントローラ	8
2.3.2	無線通信系	10
2.3.3	モータ制御系	11
2.3.4	センサ系	12
2.4	実験環境	12
2.4.1	モーションキャプチャシステム	13
2.4.2	モニタシステム	13
2.5	結言	16
第 3 章	非平面マルチロータヘリコプタの実現および運動性能の評価	17
3.1	緒言	17
3.2	単ロータモデル	17
3.3	マルチロータヘリコプタの自由度	18
3.3.1	クアッドコプタ	18
3.3.2	ヘキサコプタ	19
3.3.3	非平面マルチロータヘリコプタ	20
3.4	非平面マルチロータヘリコプタの実現可能性	22
3.4.1	マルチロータヘリコプタの角速度制御	22
3.4.2	2自由度制御系による角速度制御	23
3.4.3	角速度制御実験	29
3.5	各モデルの機体構造における運動性能の比較	33
3.5.1	x, y 軸に関する運動	33
3.5.2	z 軸に関する運動	33
3.6	結言	36
第 4 章	最適制御理論を用いた姿勢制御および速度制御	38

4.1	緒言	38
4.2	最適制御理論	38
4.3	オブザーバ	41
4.4	姿勢制御	42
4.4.1	モデリング	42
4.4.2	姿勢制御系設計	44
4.4.3	姿勢制御実験	46
4.5	速度制御	46
4.5.1	モデリング	47
4.5.2	速度制御系設計	49
4.5.3	速度制御実験	52
4.6	回転・並進独立制御実験	57
4.6.1	回転運動の独立性の実証実験	59
4.6.2	並進運動の独立性の実証実験	59
4.7	位置制御	60
4.7.1	位置制御系	62
4.7.2	位置決め精度比較実験	62
4.8	結言	63
第 5 章 結論		66
付録		69
角速度制御		69
角速度制御系設計 m ファイル		69
伝達関数計算ソースコード		70
運動性能評価シミュレーション		71
姿勢制御		77
姿勢モデル同定 m ファイル		77
姿勢制御系設計 m ファイル		78
速度制御		80
速度モデル同定 m ファイル		80
速度制御系設計 m ファイル		81
非平面マルチロータヘリコプタの誘導制御		84
非平面マルチロータヘリコプタの並進運動		86
誘導制御		87
参考文献		89
謝辞		92

第1章

緒論

1.1 研究背景

近年、様々な分野において小型無人航空機 (Small Un-manned Aerial Vehicle : SUAV) が注目されている。なかでも Fig.1.1, 1.2 に示す 4 発以上のロータを有するマルチロータヘリコプタは、Fig.1.3 に示すシングルロータヘリコプタのような複雑な機構をもたないシンプルな機体構造に加えて、優れた飛行性能を有する。また、全地球測位システム (Global Positioning System : GPS) などのセンサを搭載することで自律飛行が可能である。さらに、垂直離着陸が可能であるため滑空のためのスペースが不要で、利用場所の制限が少ない。以上のような利点から、様々な産業分野の任務において既に利用が始まっており、今後の期待も大きい。株式会社 MM 総研 [1] の 2016 年度ドローン国内市場規模調査 [2] によれば、Fig.1.4 のように 2016 年度 404 億円であった市場規模が 2021 年度には 1676 億円規模に達する見込みである。また、マルチロータヘリコプタの現在の活用方法と将来的なニーズについて Fig.1.5 に示す調査結果が得られている。現在、メディア・広告向けの空撮任務で広く利用されているが、将来的に施設設備の保守・点検や災害時等の危険個所の把握といった任務での利用が期待されている。これまで、マルチロータヘリコプタには、空撮業務のように低高度を飛行し、人と異なる作業領域で作業を行えることが求められていたが、点検任務や災害調査任務においては、構造物付近や倒壊した構造物の隙間など、狭隘空間での作業も求められる。文献 [3] では、災害対応、農業、インフラ点検などの各種業務における利用事例と今後の動向について述べられている。特に、インフラ点検業務については、高度経済成長期に多く建設されたインフラ設備の老朽化が顕わになる年代に差し掛かり、労働力不足および安全性の問題から、ロボットによってインフラ点検を効率化する動きがみられ [4]、今後利用が広がると考えられる。この際、「行く」、「見る・撮る」、「検出する」、「記録する」技術が必要である。以上の要素を満たすために、所望の位置へ飛行できること、撮影や検査が行えることが求められる。このように、マルチロータヘリコプタには、これまで求められてきた低高度を飛行できることに加え、作業の精密さが求められるようになっている。つまり、屋内・屋外、広大・狭隘環境といった様々な環境でも安定した飛行を実現し、正確な撮影や接触作業を実現できるロボット技術の研究開発が行われている。



Fig. 1.1 4 rotors multi-rotor helicopter(<https://www.dji.com/jp/phantom-3-adv>)



Fig. 1.2 6 rotors multi-rotor helicopter



Fig. 1.3 Single-rotor helicopter(<https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/heli/rmax.html>)

1.2 研究の目的

一般的なマルチロータヘリコプタは、Fig.1.1, 1.2 に示すようにロータが同一平面上かつ同一方向に配置されている。この場合、推力ベクトルが常に胴体の上方を向いているため、並進移動を行う際には機体を傾け、推力の水平方向成分を生成する必要がある。これはヘリコプタ固有の特徴であり、ヘリコプタが非ホロノミック系であることに起因する。そのため、並進移動時や風外乱に対抗する際には必ず姿勢変動をともなう。しかしながら、構造物に接近し、機体搭載のカメラで微小なクラックを精密撮影するインフラ点検や、狭隘空間の



Fig. 1.4 Drone market scale (<https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=221>)

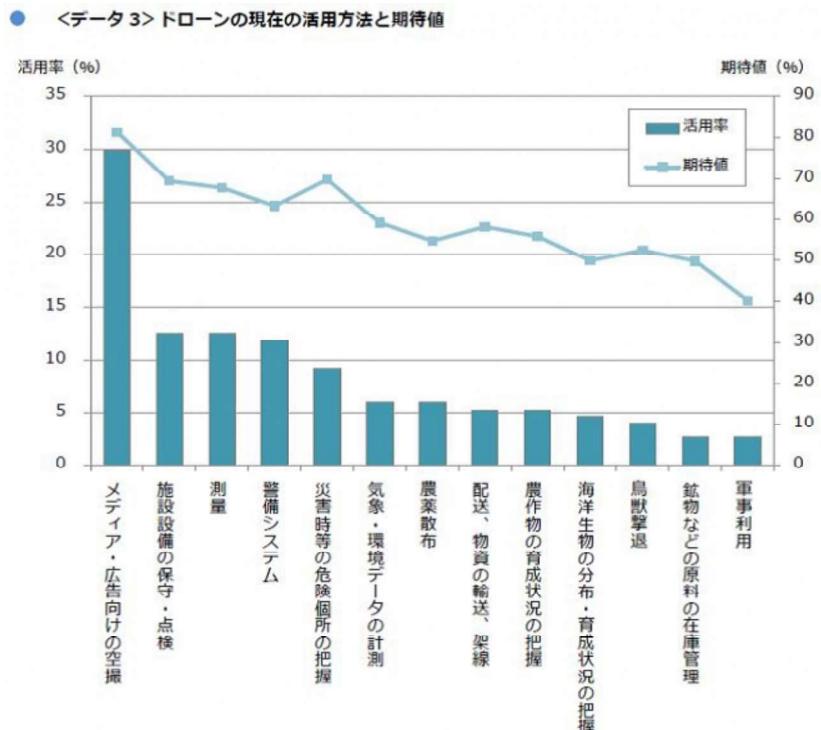


Fig. 1.5 Current uses and expected tasks (<https://www.m2ri.jp/news/detail.html?id=221>)

探索といった任務では、撮影画像の乱れや周囲環境との接触リスクが発生するため、並進運動や外乱に対抗する際に機体姿勢が変動することは望ましくない。また、接触作業においては機体姿勢が固定された状態で接触時の反力を打ち消すような外力を生成可能であること、任意の機体姿勢で機体位置を保持することが求められる。以上を背景として、回転運動と並進運動がそれぞれ独立に制御可能であるマルチロータヘリコプタの研究が行われている。文献 [5] では、Fig.1.6 に示す提案飛行体について、tilt-wing 機構を取り付け、ロータ取り付け部を回転させ、推力方向を任意に制御することを提案しており、数値シミュレーションによって垂直離着陸に加えて、並進運動を独立に制御可能であることを示している。文献 [6]

では、Fig.1.7 に示すロータ配置に加え、各ロータに Fig.1.8 に示す可変ピッチ機構を取り付ける手法を提案しており、数値シミュレーションによって任意姿勢でのホバリング可能性並びに、未知外乱下での位置決め制御可能性を確認している。また、文献 [7] では、Fig.1.9 に示すように、ロータの数を増やし、ロータ配置を非平面化することで回転運動と並進運動の独立制御を実現している。しかしながら、これらのことでは、いずれも新たなアクチュエータや機構の追加が必要となり、マルチロータヘリコプタの利点であるシンプルな機体構造を損なってしまうという問題がある。この問題に対し、従来のマルチロータヘリコプタのシンプルな機体構造を損なうことなく、回転運動と並進運動を独立に制御可能な非平面マルチロータヘリコプタが提案されている [8] [9]。文献 [8] では、ロータを傾けて取り付けることで推力の水平成分を生成し、回転と並進の 6 自由度独立に運動可能な非平面マルチロータヘリコプタを提案している。さらに、可操作性橈円体を用いたロータ傾斜角度の最適設計手法も提案されている。文献 [9] では非平面マルチロータヘリコプタの回転運動と並進運動の独立制御性を確認している。また、従来のマルチロータヘリコプタ同様の並進移動と姿勢変化を伴わない並進移動について述べており、両者の切り替え制御によって位置制御の性能を向上させている。文献 [8] では、Fig.1.10 に示す各ロータを機体内側と外側に交互に傾けて取り付ける構造が提案されており、文献 [9], [10], [11] では、Fig.1.11 に示す機体中心と各ロータ中心を結ぶ軸をねじる方向にモータを傾けて取り付ける構造が採用されている。どちらも、従来のマルチロータヘリコプタのシンプルな機体構造を損なうことなく、回転運動と並進運動が独立制御可能であることが示されている。このように、回転運動と並進運動が独立制御可能なマルチロータヘリコプタの開発がされているが、これらの文献ではロータ取り付け角度の設定など構造の最適設計はされていない。それに対して、マルチロータヘリコプタの機体構造の最適設計手法に注目した研究が存在する [12] [13]。文献 [12] では、動的可操作度と最大並進加速度を指標とし、運動性能やペイロードを考慮した構造最適化手法が提案されている。また、文献 [13] では、推力とトルクがそれぞれ生成する凸包の体積を指標として、生成可能な最大推力およびトルクを考慮した Particle Swarm Optimization(PSO) [14] を用いた構造最適化手法を提案している。両者の構造最適化手法から得られた最適構造は、文献 [10]、文献 [11] で採用されている機体構造と同様に、機体中心とロータ中心を結ぶ軸をねじる方向に傾けてロータを取り付けたものである。しかしながら、これらの文献では理論的な構造最適化は行われているが、実験的な検証はされていない。

本研究では、文献 [12], [13] の研究から得られた回転運動と並進運動が独立制御可能な非平面マルチロータヘリコプタおよび従来のマルチロータヘリコプタの実機を製作し、各機体構造について比較し、最適性を検証し、飛行実験を通して提案飛行体の有効性を示すことを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は、全 5 章で構成されている。第 2 章では、実際の制御対象および制御装置について述べる。第 3 章では、それぞれの機体構造のコンセプトおよび実現可能性について述べ、各飛行体の比較を行う。第 4 章では、回転運動および並進運動の制御について述べ、実機実験によって有効性を検証する。第 5 章では、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

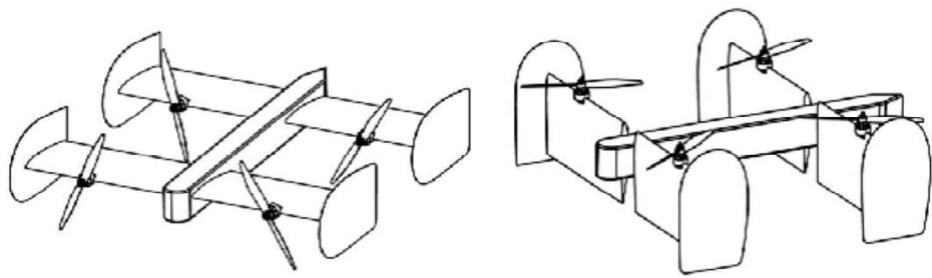


Fig. 1.6 Aerial vehicle in horizontal and vertical flight modes [5]

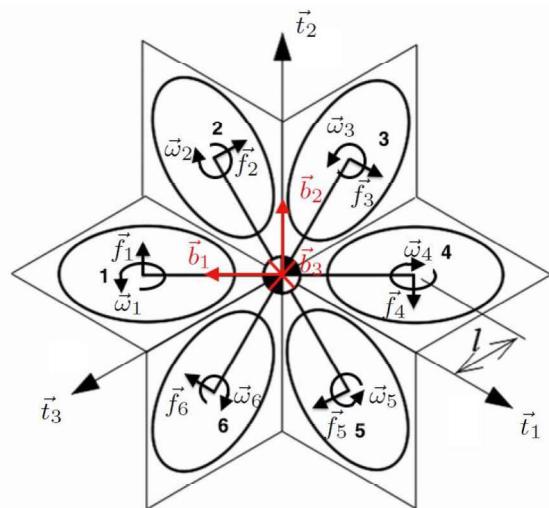


Fig. 1.7 The hexrotor UAV configuration consists of six actuators [6]

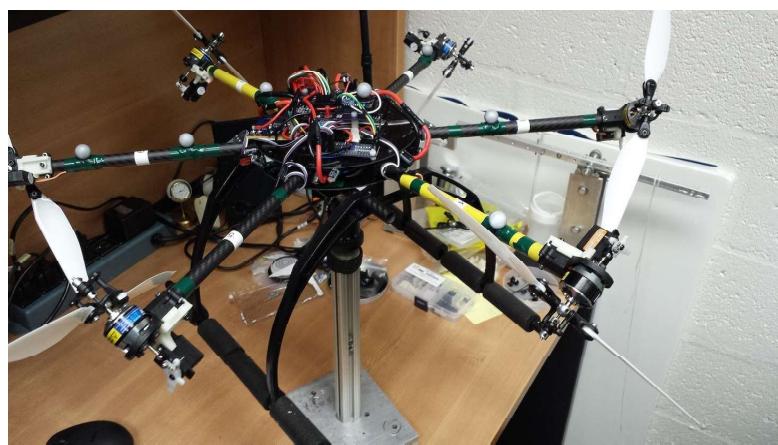


Fig. 1.8 Variable pitch propellers via a four-bar mechanism [6]

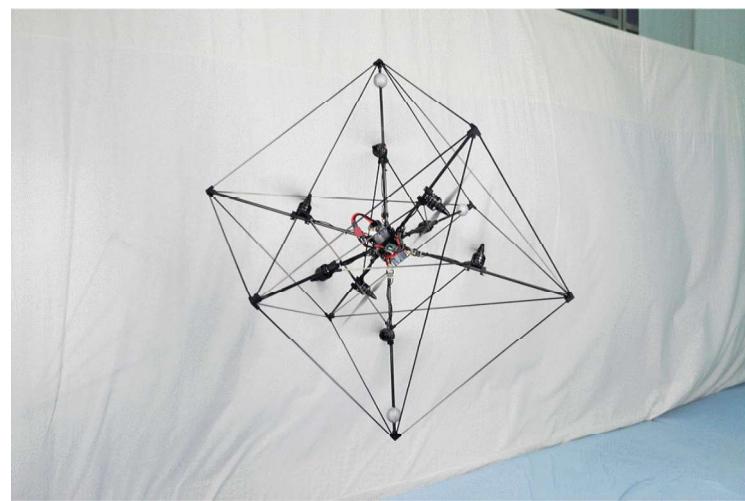


Fig. 1.9 Omni-directional aerial vehicle [7]

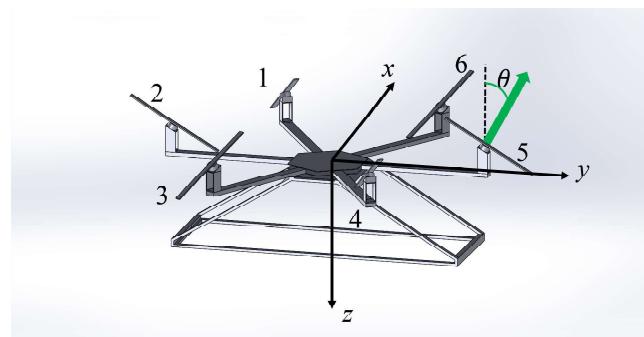


Fig. 1.10 Model of inside-outside non-planar multi-rotor helicopter

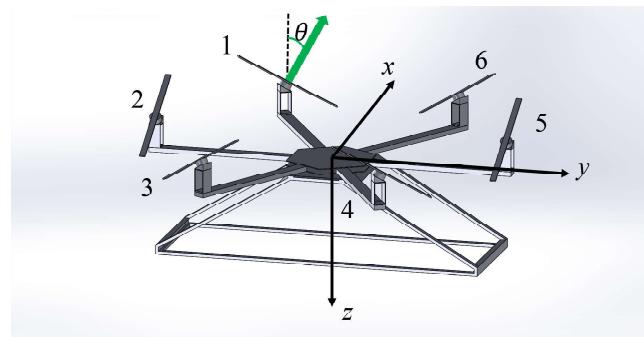


Fig. 1.11 Model of twisted non-planar multi-rotor helicopter

第2章

制御対象とシステム

2.1 緒言

本研究は、非平面マルチロータヘリコプタの有効性の実証をテーマとしている。文献 [8] では、非平面マルチロータヘリコプタの実現可能性は理論的な証明に留まっており、実機実験による実証はされていない。また、文献 [9] についても、具体的な制御手法が示されているが、文献 [8] の理論的な実現可能性の証明を前提としたシミュレーションによる検証に留まっている。実現可能性を実証するための実験に向けて、提案飛行体および比較対象である従来のマルチロータヘリコプタそれぞれの実機の製作、制御システムの構築および、実機実験による定量的な評価のための実験環境の構築が必要である。

本章では、はじめに、製作した提案機体および比較用の従来機体について述べる。つづいて、処理系、通信系、センサ系などからなる制御システムについて述べ、最後に、実験環境について述べる。

2.2 制御対象

本研究では、従来のマルチロータヘリコプタと提案する非平面マルチロータヘリコプタを制御対象とする。Fig.2.1 が従来のマルチロータヘリコプタの実験機であり、本論文では、このモデルを平面型と呼ぶ。Fig.2.2, 2.3 の 2 機が非平面マルチロータヘリコプタであり、これらのモデルをそれぞれ内外傾斜型、ねじり型と呼ぶ。非平面マルチロータヘリコプタは Fig.2.4 に示すロータアダプタを用いて、ロータに傾斜角をつけて取り付けている。内外傾斜型は、Fig.2.2 に示すように、6 つあるロータを 3 つずつ、機体中心と機体外側に向かって交互に傾けている。ねじり型は、Fig.2.3 に示すように、6 つあるロータを 3 つずつ、機体中心とロータ中心を結ぶ軸を右ねじ方向、左ねじ方向に交互にねじるように傾けている。各機体はサイズおよび質量が同程度となるように設計している。機体の仕様を Table 2.1 に示す。

2.3 制御システム

つぎに、制御システムについて述べる。制御システムは、マイクロコントローラ、無線通信系、モータ制御系、センサ系からなる。制御システムの概要を Fig.2.5 に示す。RC 送信機および無線通信モジュールによって基地局との通信を行う。基地局から送信されたデー



Fig. 2.1 Planar type helicopter



Fig. 2.2 Inside-outside non-planar multi-rotor helicopter

タ，モーションセンサからのデータを取り込み，制御ボードで制御演算を行い，スピードコントローラによって各モータを制御する。図中，実線が有線通信，破線が無線通信をそれぞれ表す。以上が，制御システムの概要である。

2.3.1 マイクロコントローラ

組み込みの制御ボードとして，マイクロコントローラを使用する。マイクロコントローラは Cypress 社の Programmable System-on-Chip(PSoC) を採用する。PSoC は，任意の構成が可能なアナログおよびデジタル周辺機能，メモリ，マイクロコントローラを 1 つのチップに搭載した Programmable 組込みシステムであり [15]，Fig.2.6 に示すように，ペリフェラルの追加や修正を開発環境から容易に行うことができるという特徴を持つ。ペリフェラルとは，コンピュータと組み合わせて利用される各種の機器のことであり，ディスプレ



Fig. 2.3 Twisted non-planar multi-rotor helicopter



Fig. 2.4 Rotor adapter

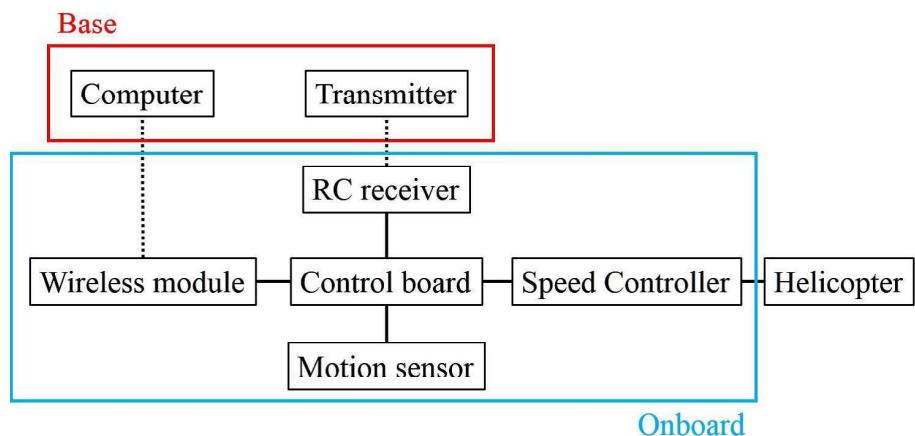
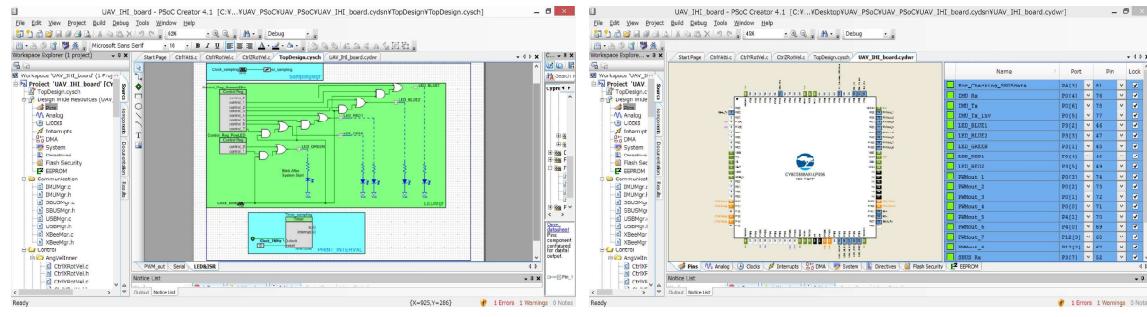


Fig. 2.5 Control system

Table 2.1 Vehicle specification

Body size	$700 \times 600 \times 400 \text{ mm}^3$
Total mass	5.0 kg
Number of rotors	6
Propellers diameter	330 mm
Battery	6 Cells Li-Po × 2



(a) Peripheral arrangement

(b) Pins arrangement

Fig. 2.6 PSoC creator



Fig. 2.7 Control board

イ、ハードディスクドライブ、フラッシュメモリなどが代表的な周辺機器にあたる。本研究では、センサ情報の取得および統合、制御演算、各モータへの指令値の生成を行っている。Fig.2.7に制御基盤の外観を示す。PSoC、基地局との通信モジュール、電源ポート、モータ制御およびセンサとの通信用ピンが実装されている。

2.3.2 無線通信系

本制御システムは3系統の無線通信回線を有している。センサデータやモータへの回転指令値などの内部情報を基地局へ送信する送信系、基地局から外界センサデータを受信する受信系、Transmitterからの操縦指令値を受信する操縦系の3系統である。



Fig. 2.8 S.BUS receiver (Futaba R6303SB)



Fig. 2.9 Transmitter (Futaba 14SG)

送信系および受信系は、Fig.2.7 中、左部に搭載されている無線シリアル通信モジュール XBee を用いて通信を行っている。XBee は Wi-Fi や Bluetooth モジュールに比べ、消費電力が低いため、組み込み系に適している。また、モジュールに関する設定はすべて専用ソフトウェアからでき、複数台の機器と同時接続してデータを送受信できるため、システムの拡張および再構成が容易である。

操縦系は、双葉電子工業 [16] が開発、販売している S.BUS 通信モジュール R6303SB と Transmitter の 14SG を使用している。外観を Fig.2.8, 2.9 にそれぞれ示す。Transmitter との通信はシリアル通信で行われ、SBUS protocol [17] に従う。Transmitter には Fig.2.9 に示すように、ジョイスティックやスイッチが搭載されている。いま、ジョイスティックによって、機体に操縦指令値を与え、スイッチによって、飛行モードの切り替え、制御開始/終了命令を与えている。

2.3.3 モータ制御系

HOBBYWING [18] の Electric speed controller(ESC) を用いてモータの回転数を制御する。本スピードコントローラは、航空機やヘリコプタに対応しており、高性能のマイクロ

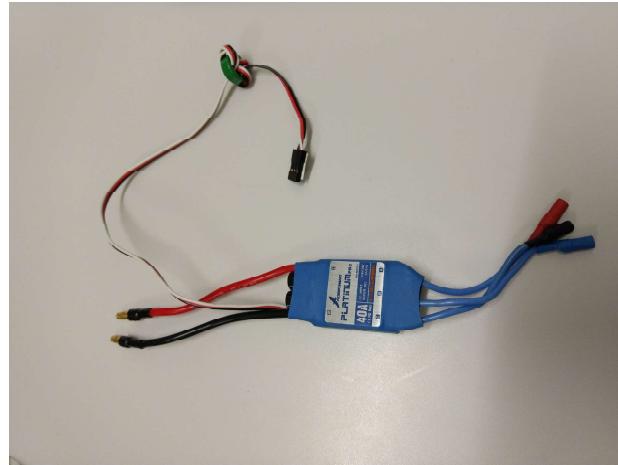


Fig. 2.10 Electric speed controller

Table 2.2 Electric speed controller specification

Dimensions	W27×D59×H12 mm
Weight	38 g
Output	40 A
Input voltage	2 - 6 cells lithium battery
Maximum speed	210000 rpm for 2 Poles brushless motor
	70000 rpm for 6 Poles brushless motor
	35000 rpm for 12 Poles brushless motor

プロセッサによって、様々なモータとの互換性があり、高い駆動効率を実現する。外観を Fig.2.10 に、仕様を Table 2.2 にそれぞれ示す。Fig.2.7 上部のピンからモータへの回転指令値となるパルスを ESC に与え、モータを制御する。

2.3.4 センサ系

航法センサとして東京航空計器社のモーションセンサユニット CSM-MG200 を採用する [19]。本センサは 3 軸角速度センサと 3 軸加速度センサを搭載した全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System : GNSS) 補正型のモーションセンサユニットであり、位置・速度・方位・姿勢等を高精度に計測できる。また、加速度や角速度などの計測も同時にできる、オールインタイプのモーションセンサユニットである。通信インターフェースには産業用途で広く使用されている TIA422(RS422) を使用している。外観を Fig.2.11 に、仕様を Table 2.3 にそれぞれ示す。

2.4 実験環境

本研究では、マルチロータヘリコプタシステムを組み込み系で制御している。そのため、実験時に組み込み系内部の情報を得るために、テレメトリングソフトを開発する。屋外での実験時は、GNSS データを取得できるが、屋内での実験時は、機体の位置および速度、方位



Fig. 2.11 Motion sensor unit (CSM-MG200)

Table 2.3 Motion sensor unit specification

Dimensions	W36×D56×H17 mm
Weight	36 g or less
Supply voltage	DC 5~12 V
Power consumption	1.5 W Max
Output frequency	400 Hz

を取得するためのシステムを構築する必要がある。本研究では、モーションキャプチャによってそれらのデータを取得する。本節では、これらの実験システムについて述べる。

2.4.1 モーションキャプチャシステム

通常、マルチロータヘリコプタの飛行において、GPSによる位置計測が行われるが、屋内などの非 GPS 環境下では、モーションキャプチャによる位置計測が一般的に行われている。本研究においても、屋内の飛行実験においては、モーションキャプチャを用いて機体の状態を取得する。モーションキャプチャは OptiTrack の Prime13 を使用している。外観を Fig.2.12、仕様を Table 2.4 にそれぞれ示す。Prime13 で機体に複数設置した赤外線マーカを撮影し、それらの位置関係およびそこから算出した機体中心を計測することで、機体位置、姿勢などを得ることができる。機体に設置した赤外線マーカを Fig.2.13 に示す。

2.4.2 モニタシステム

飛行中の制御系の動作確認および異常検知、センサの動作確認などのために、テレメトリングによって組み込み系内部のデータを抜き出し、基地局でモニタリングする。テレメトリングソフトの外観を Fig.2.14 に示す。モニタで機体角速度、姿勢などのセンサデータに加え、Transmitter の入力などをモニタリングでき、データを保存することでオフラインでの



Fig. 2.12 Motion capture (Prime13)

Table 2.4 Motion capture specification

Lens horizontal FOV	56 deg
Lens vertical FOV	48 deg
Range	10 m
Resolution	1280 × 1024
Frame rate	30 - 240 FPS
Delay	4.2 ms
Shutter speed	0.01 - 3.9 ms

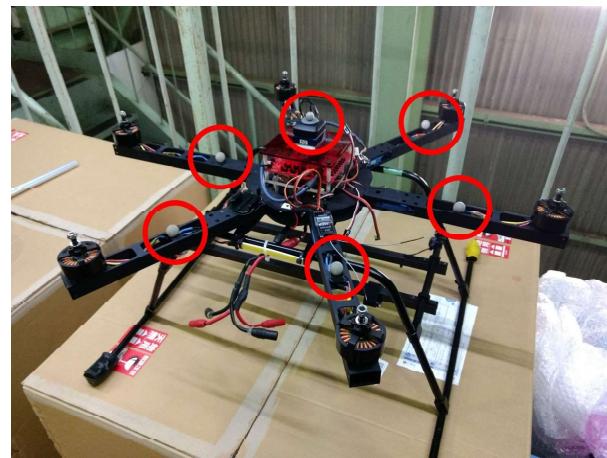


Fig. 2.13 Marker arrangement

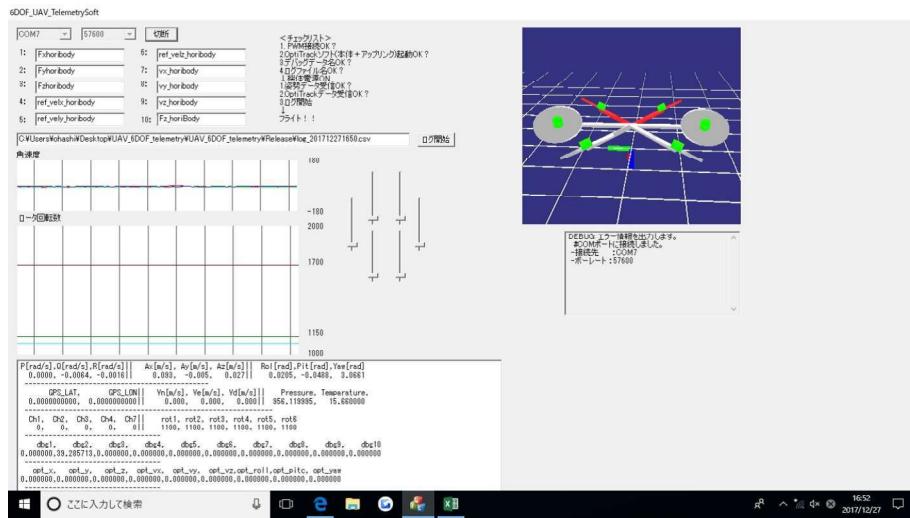


Fig. 2.14 Telemetering software

Table 2.5 Telemetering data

Data	The number of axis
Time	1
Angular velocity	3
Acceleration	3
Attitude	3
Latitude	1
Longitude	1
Velocity	3
Pressure	1
Temperature	1
Transmitter input	8
Motor pulse	6
Motion capture position	3
Motion capture velocity	3
Motion capture attitude	3
Debug data	22

データ処理が可能である。また、通信データに冗長なパケットを持たせることで、制御系の内部変数などを取り込み、デバッグ作業などに使用できる仕様となっている。機体姿勢を視覚的に認識しやすくするアニメーションを表示している。データセットを Table 2.5 に示す。ただし、この表は取得データの数および順序を示しているに過ぎず、実際には、通信料の制約のために適宜分割して送信しており、ヘッダおよびフッタ、ラベルを設定しているが、今回は省略している。また、各データは複数バイトから成るため、1 データを複数バイトに分割送信し、受信側で再構築している。

2.5 結言

本章では、平面型、内外傾斜型、ねじり型の3つのマルチロータヘリコプタを制御対象とし、制御システムおよび実験システムを構築した。制御システムについては、制御用組み込みコンピュータによって、操縦指令値やモーションセンサデータを取り込む通信系を構築した。また、実験時のデータをモニタリングするテレメトリングシステムを構築した。また、モーションキャプチャを用いて機体のモーションデータを取得することで、屋内でも実験可能とした。以上で、飛行実験のためのシステム開発が完了した。