

課題情報シート

テーマ名 :	飛行型観測装置の開発				
担当指導員名 :	岡田 正之	実施年度 :	23 年度		
施設名 :	九州職業能力開発大学校				
課程名 :	応用課程	訓練科名 :	生産システム技術系		
課題の区分 :	開発課題	学生数 :	14	時間 :	54 単位 (972h)

課題制作・開発のポイント

【開発（制作）のポイント】

飛行装置本体の設計において、今まで作成されていない6ローターを大小2つの正三角形形状に配置することで構造的な安定度を確保しました。姿勢制御には、加速度センサ、ジャイロセンサとPID制御による方法を取っています。ただし、PIDのゲインの最適値を求めることができずに操作難度が上がってしまい、目標達成までには至りませんでした。

【訓練（指導）のポイント】

装置構造は、軽量、耐久性、安定度を考慮した設計を行わせました。電子回路設計においては、ノイズ対策、ローパスフィルタ等を回路内に組み込んでいます。制御プログラムに関しては、6ローターの制御方法を Pitch、Roll、Yaw についての6ローターの制御を習得させた後にPID制御も取り入れながらのプログラムの作成を行わせました。

飛行装置は、実際に浮上するため最初は興味を示さなかった学生も参加するようになりました。当然実験段階において機体が破損することもあり、その都度新しいアイデアで確実に実用化に近づきつつありました。興味を持たせることができれば、学生独自で完成に向かって努力し自然に関連技術も習得できていました。

課題に関する問い合わせ先

施設名 : 九州職業能力開発大学校
住所 : 〒802-0985 福岡県北九州市小倉南区志井 1665-1
電話番号 : 093-963-0125 (代表)
施設 Web アドレス : <http://www3.jeed.or.jp/fukuoka/college/>

課題制作・開発の「予稿」および「テーマ設定シート」

次のページ以降に、本課題の「予稿」および「テーマ設定シート」を掲載しています。

飛行型観測装置の開発

生産機械システム技術科	4名
生産電子システム技術科	5名
生産情報システム技術科	5名

1. はじめに

原発事故や自然災害などに代表される、被災地で危険を伴う場所の調査等に無人の飛行型装置（ヘリコプター）の活用は有用な手段の1つである。飛行型装置は通常シングルローターヘリが一般的であるが多ローター型ヘリの開発も進んできている。多ローター機構は中心部から等距離に偶数个配置された飛行装置が一般的である。これは制御上ヨーイングを抑えるために正逆回転のプロペラ枚数を同数にすることが出来るためである。図1に8ローターを使用した飛行装置を示す。

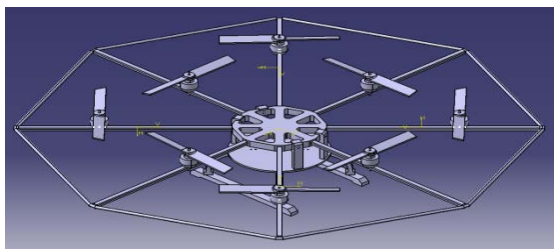


図1 8ローター型ヘリコプター

しかし、本研究では図2のように各ローター6個を正三角形の頂点に配置することで飛行中の安定度が増し姿勢制御が用意になると考え、この形状の装置を無線制御で操作可能な装置として開発することとした。また、多ローターで一般的な4ローター(ここでは、8ローター)と比較することで三角型ヘリコプターの安定度も検証する。今後は、本ヘリコプターを三角型ヘリコプターと呼ぶ。

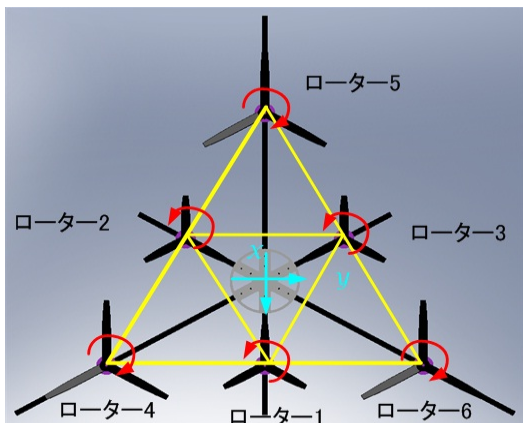


図2 三角型ヘリコプターモデル

2. 課題概要

本来、ヘリコプターなどに代表される飛行装置は飛ばすだけでも熟練した技術が必要であり、初心者が思い通りに飛行させることはほとんど不可能である。そこで、本研究で開発する三角型ヘリコプターは、熟練した技術を必要としない操作で航行させることができる。使用される用途として、災害地や農業分野(農薬散布など)、遺跡調査といった幅広い用途で使われることを考えている。

飛行制御は、8ローター型ヘリでは8枚のプロペラで内4枚のプロペラで機体の姿勢を保つ。三角型ヘリコプターに対しては、6枚のプロペラの内、3枚のプロペラで姿勢を保つことで常に安定した航行を行う。

3. 力学と制御モデル

図3に三角型ヘリコプターの構造である。ローター4,5,6が時計方向に回転、ローター1,2,3が反時計方向に回転することでホバリング時に発生する各ローターの反トルクを相殺する。z方向に発生させる揚力は、各ローターから発生する揚力の総和となる。8ローターヘリは、図1を参考に内側ローターを1,2,3,4とし反時計方向、外側ローター5,6,7,8を時計方向とすることで、三角型ヘリコプターの姿勢運動と8ローターヘリは同様に考えられる[1]。

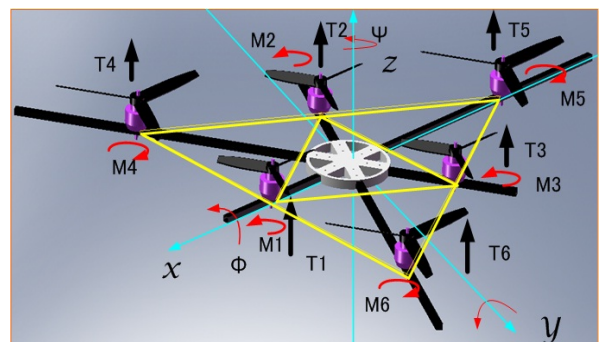


図3 三角型ヘリコプターの概要

3.1. 力学モデル

今回は、三角型ヘリ(6ローター)をベースとする。モーメントは、

$$M = I_b \dot{\omega}_B + \omega_B \times I_b \omega_B \quad (1)$$

慣性モーメント： $I_b \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ，角速度： $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ ，各座標のモーメント： $M \in \mathbb{R}^3$ とする。また，ローリング角を ϕ ，ピッチング角を θ ，ヨーイング角を ψ としており，各ローター i の揚力を T_i ，その時のベクトルを I_i ，ローター個々のモーメントを M_i とすると，

このヘリコプターに働く力 F とモーメント M は，

$$F = \sum_{i=1}^6 (-T_i R_{R_i, I} Z_{R_i}) \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^6 (M_i + I_i \times (-T_i R_{R_i, B} Z_{R_i})) \quad (3)$$

外乱，重力は無視している。 $R_{R_i, I}$:各ローターのこの行列， Z_{R_i} :全体の傾き座標， $R_{R_i, B}$:ヘリコプター全体の行列

姿勢の制御は，ローター1,2,3のみで行う。ローター1,2,3の回転総和を保持し，それぞれの回転数を操作する。ローター4,5,6は，全て同一回転でローターを回転させる。この制御方法により，ローリングモーメント ϕ はローター2,3の回転数を上下で行い，ピッチングモーメント θ はローター1とローター2,3の回転数を同時に上下させることで操作する。ヨーイング ψ はローター1,2,3とローター4,5,6の回転数を同時に上下させることにより発生する。

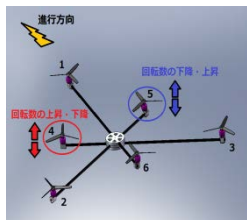


図 4 ローリング制御

ローリング制御は，進行方向に向かってヘリの左右バランス調整をする操作であるが，三角型ヘリは図4に示すように $\cos(\pi/6)$ 分モーメントに影響することを考慮しなければならない。

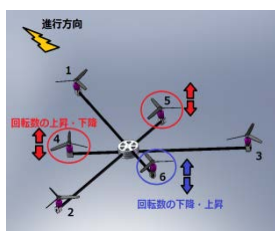


図 5 ピッチング制御

ピッチング制御は，進行方向に向かってヘリ

の前後バランスを調整する操作であるが，ローリング制御同様に三角型ヘリは図5に示すように2個のローターには $\sin(\pi/6)$ 分モーメントに影響する。

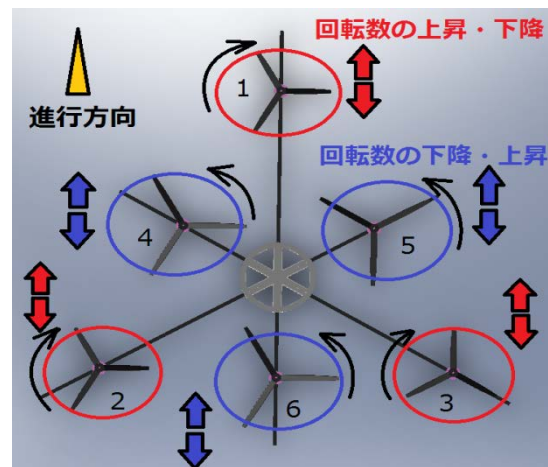


図 6 ユーイング制御

ヨーイング制御とは，機体の中心を軸とした機体の回転に対する制御である。反時計回りと時計回りのローターで機体の回転を防ぐ制御のことである。これらの制御を考慮した制御方法を以下に述べる。

3.2. 姿勢制御

本制御対象は，アクチュエータとしてブラシレスモーターを使用している。このブラシレスモーターは，パルス幅で回転数を制御する方式である。ここで， ω_i :各ローター角速度， T_m :モータ時定数， k_m :比率ゲイン， τ_i :パルス幅を表すとす。同定実験より，アクチュエータを以下の1次遅れとする。

$$\dot{\omega}_i = -\frac{1}{T_m} \omega_i + \frac{k_m}{T_m} \tau_i \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{T_m} \omega_j - \frac{k_m}{T_m} \tau_j \quad \text{for } j = 4, 5, 6 \quad (5)$$

ローター1,2,3とローター4,5,6で回転方向が異なる為，入力パルスの符号を場合分けしている。図3より，ローリングモーメント ϕ とピッチングモーメント θ は，揚力 T_i を用いると

$$\phi = (T_3 - T_2) l \cos \frac{\pi}{6} \quad (6)$$

$$\theta = \left(T_2 \sin \frac{\pi}{6} + T_3 \sin \frac{\pi}{6} - T_1 \right) l \quad (7)$$

ここで， l はローター1,2,3と三角型ヘリコプターの重心距離とする。揚力 T_i はローター角速度の二乗に比例すると仮定する[2]。

$$T_i = C \omega_i^2 \quad \text{for } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (8)$$

ここで， C は揚力定数を表す。式(8)を使用して式(6)，(7)を表現すると

$$\phi = (\omega_3^2 - \omega_2^2)Cl \cos \frac{\pi}{6} \quad (9)$$

$$\theta = \left(\omega_3^2 \sin \frac{\pi}{6} + \omega_2^2 \sin \frac{\pi}{6} - \omega_1^2 \right) Cl \quad (10)$$

ヨーイングモーメント ϕ は、各ローター反トルク t_i を用いると

$$\psi = t_4 + t_5 + t_6 - t_1 - t_2 - t_3 \quad (11)$$

反トルク t_i は、各ローターが回転する際に受ける空気抵抗による負荷トルクであり、ローター角速度の二乗に比例すると仮定する[2].

$$t_i = K\omega_i^2 \quad \text{for } i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (12)$$

K は抗力定数を表す. 式(12)を用いると式(11)は、

$$\psi = (\omega_4^2 + \omega_5^2 + \omega_6^2 - \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_1^2) K \quad (13)$$

制御は、4ローター型ヘリ等で行われている方法で可能である.

4. 装置機構

装置の材質として、中心部には ABS 樹脂を使用している. これは、剛性や加工性、耐衝撃性、曲げ疲労性など機械的特性のバランスに優れている. また、フレーム部には、ファイバカーボンを使用している. これは、鉄と比較すると比重 1/4, 比強度 10 倍ほどという軽くて強い特徴がある. この材質を使用して作成した 8 ローターを図 7 に三角型ヘリを

4.1. 8 ローター型ヘリ

8 ローター型ヘリの特徴として、8 枚のプロペラで空中航行を行うことから、搭載能力が約 15kg という大きなパワーを持っていることである.



図 7 8 ローター型ヘリ

12 インチの 3 枚羽のプロペラをブラシレス DC モーターに付けており揚力が各モーター毎に 3kg あり、モーター 8 個で 24kg の揚力を持つ

ていることとなる.

表 2 8 ローター型ヘリの仕様

全幅	1120mm
全高	260mm
重量	5kg
搭載能力	約 15kg
動力	ブラシレス DC モーター
最大飛行時間	約 20 分
消費電流	約 4.4A

8 ローター型ヘリに搭載する制御機器を表 3 に示す. CPU として、RX62-N を使用し、電源はリチウムポリマ電池 2 個、動力はブラシレス DC モーター 8 個を姿勢制御用にジャイロセンサと加速度センサを搭載している.

表 3 8 ローター型ヘリ搭載機器

搭載機器	型番
CPU	RX62-N
3 軸加速度センサ	KXM52-1050
ジャイロセンサ	CGY750
モーター	Hacker A30-16M×6
モータードライバ	Hacker X-40-SB Pro×6
無線	Xbee-PRO ZB
電源	Li-Po(2200mA/h)×2 Li-Po(1100 mA/h)

4.2. 三角型ヘリコプター

三角型ヘリコプターは 8 ローターヘリ同様の使用となっており、ブラシレス DC モーター 6 個で 18kg の揚力を持っている.



図 8 三角型ヘリコプター

しかし、搭載能力としては十分であるが 8 ローターヘリも同様に飛行時間と軽量化にともなう強度が問題となってくる. 表 4 に 6 ローターの仕

様を示す。

表 4 三角型ヘリコプターの仕様

全幅	1185mm
全高	230mm
重量	4kg
搭載能力	約 11kg
動力	ブラシレス DC モーター
最大飛行時間	約 20 分
消費電流	約 4.4A

搭載する制御機器は、表 5 に示す通り CPU に SH7211, 動力はブラシレス DC モーター 6 個, 電源はリチウムポリマ 2 個, ジャイロ, 加速度センサも 8 ローター同様に搭載している。

表 5 三角型ヘリコプター搭載機器

搭載機器	型番
CPU	SH7211
3 軸加速度センサ	KXM52-1050
ジャイロセンサ	CGY750
モーター	Hacker A30-16M×6
モータードライバ	Hacker X-40-SB Pro×6
無線	Xbee-PRO ZB
電源	Li-Po(2200mA/h)×2 Li-Po(1100 mA/h)

4.3. 制御の流れ

プロポからの信号 4ch{スロット(Throttle), ローリング(Roll), ピッチング(Pitch), ヨーイング(Yaw)}を受け, Gyro 制御を通した後, 各 high 信号長を取得し, 各モータードライバに計算処理した結果を出力する。

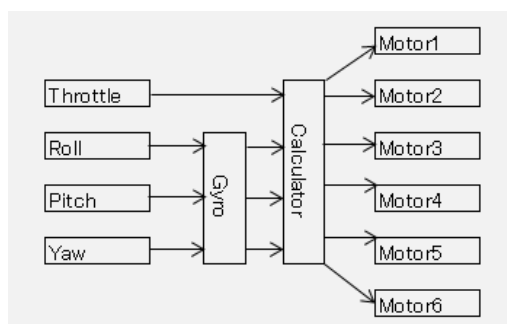


図 9 制御信号の流れ

ここでは, CPU タイマーを使用して信号長を取得しているため, 入力用として 4in, 出力用として三角型ヘリの場合は 6out, 8 ローターヘリの場合 8out が必要となる。しかし, 姿勢制御に使用

していないローターは, スロットルデータを直接出力すればよく最低出力数は, 三角型ヘリで 4out, 8 ローターヘリで 5out で良いことになる。本課題で選択した 2 種類の CPU とともにタイマー入出力として使用可能なポート数が 11port で条件を満たしている。また, 姿勢制御処理に要する時間は, プロポ信号に依存し, 使用している送信信号が 4ch 並列入力で周期 14ms であり, その間 high 信号となる時間が 2ms(max)であるため入力時間に 2ms, 出力時間に 2ms 最高必要で, その他全ての処理を 10ms 以内で計算する必要がある。

5. 取組状況

現在, 三角型ヘリコプター及び 8 ローター型ヘリは飛行実験の最中となっている。3 節で示した制御方法をベースにプログラム作成し, 現在は微調整段階まで到達した。

6. 解決すべき問題点・課題等

三角型ヘリコプターは, 飛行実験で安定した航行を行うための最適な制御方法が模索してきたがようやく微調整段階まで到達した。8 ローターとの比較検証をしなければならないところであるが, 軽量化を行ったためシミュレーション値以上に各ローターを支えているフレームに負荷がかかりモーターのパワーに耐えられなくなった。そのため, 8 ローターの機構組み立てが遅れ比較検証に至っていない。また, 開発工程での遅れの最たる原因は, 材料調達であり円滑な調達ができるシステムに変更するべきである。

7. まとめ

本課題では, 飛行型観測装置の開発として, プロポのみの簡単操作で空中航行する 8 ローター型ヘリと三角型ヘリコプターの開発を行った。8 ローター型ヘリよりも飛行中の安定度が高い正三角形に配置した三角型ヘリコプターの優位性を証明する必要がある。

【参考文献】

[1] Gabriel M. Hoffmann, Steven L. Waslander, Quadrotor Helicopter Trajectory Control, American Institute of Aeronautics and Astronautics

[2] 瀬古 大輔, 横山 誠, バックステッピング法による 4 ローター小型ヘリコプターの姿勢安定化制御, 第 10 回運動と振動の制御(2007)

最後に, 飛行型自律航行装置の開発を協力して頂いた諸先生方に深く御礼申し上げます。

課題実習「テーマ設定シート」 開発課題実習（生産システム技術系）

作成日： 3月16 日

科名：生産システム技術系

教科の科目		実習テーマ名	
精密機器設計製作課題実習（生産機械システム技術科） 電気制御システム課題実習（生産電子システム技術科） 計測システム応用構築実習（生産情報システム技術科） （開発課題実習）		飛行型観測装置の開発	
担当教員		担当学生	
○生産情報システム技術科 岡田正之			
生産機械システム技術科 新貝雅文			
生産電子システム技術科 佐藤幸司			
課題実習の技能・技術習得目標			
飛行型観測装置の開発を通して、「ものづくり」全工程を行うことにより、複合した技能・技術及びその活用能力（応用力、創造的能力、問題解決能力、管理的能力等）を習得することを目的としています。具体的には、解析を主体とした製品設計技術、精密加工技術を複合的に活用した製品製造技術、製品設計製造情報のドキュメント作成及び管理技術などの習得を目標にします。			
実習テーマの設定背景・取組目標			
実習テーマの設定背景			
地震や台風などの自然災害や危険を伴う観測には、衛星や小型飛行機、有人ヘリコプターなどが活用されてきました。衛星や小型飛行機による観測ではマクロ的な領域を観測できるが観測点からの距離が離れているため間に障害物（雲や木々など）が入り観測点の状況が把握できない問題や有人ヘリコプターでは人命の問題で本当に必要な観測点まで到達できない現状が多々発生してきました。そのため、無人で観測点をミクロ的に観測できる観測装置のニーズが高まってきています。企業や大学でも既に開発に着手していますが、開発コスト等で安価で高性能な製品はまだ開発されていません。そこで、今開発では操作者に負担を強いることなく容易に観測点のデータ収集等が行えることを目的としたテーマ設定としました。			
実習テーマの特徴・概要			
ヘリコプターを制御するためには、加速度センサ、ジャイロセンサ等を有効に使用し制御理論に基づく実装が必要になります。回路設計では、送受信に使用する 2.4GHz という高周波やモーターの回転による振動も考慮した設計が要求されます。機構設計では、軽量かつ耐久性のある素材選択と繊細で高度な加工技術が問われます。機械、電子、情報の総合的な技術統合となる開発です。総務省の地域戦略 ICT 開発の共同研究の一環として組み込まれているテーマであり、総務省への報告が義務付けられています。			
No	取組目標		
①	飛行装置のCAEを援用したメカニカル設計、切削を複合的に活用し、機体を完成させます。		
②	課題装置を設計する際に品質、コスト及び納期をバランス良く調和させます。		
③	機構部を設計する際、独自性を持って創意工夫をします。		
④	装置を設計製作する際、理論と現場の技能・技術を複合して取り組みます。		
⑤	課題を解決するために必要な情報を収集し、分析・評価して合理的な手順や方法を提案します。		
⑥	工程・日程・人材・他部門との関係・予算・リスク等の観点から計画を立て、進捗を調整します。		
⑦	グループメンバーの意見に耳を傾け、課題解決に向けた目的や目標及び手順や方法について共通の認識を持ちます。		
⑧	各自が与えられた役割を果たし、グループメンバーをフォローし合って、グループのモチベーションを維持します。		
⑨	図や表を効率的に利用した分かり易い報告書や発表会予稿原稿を作成し、発表会では制限時間内に伝えたい内容を説明します。		
⑩	5S（整理、整頓、清掃、清潔、躰）の実現に努め、安全衛生活動を行います。		