

プログラム名：タフ・ロボティクス・チャレンジ

PM名：田所 諭

プロジェクト名：ロボットプラットフォーム

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 7 年 度

研究開発課題名：

タフロボット型災害対応飛行ロボットに関する研究

研究開発機関名：

千葉大学

研究開発責任者

野波健蔵

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

- (1) 3次元ビジュアル SLAM を用いた屋内外でのマッピングと自己位置推定・自律飛行制御
3次元ビジュアル SLAMは、GPS電波を受信しないで自律飛行が可能となる究極の飛行方式であり、鳥などの飛行に似た生物型飛行の実現であり、飛行ロボットのタフさを実現するためには欠かせない有力な飛行方法である。
本年度は昨年に引き続いて基本アルゴリズムの検討を行う。
- (2) オプティカルフローを用いた速度制御と自己位置推定
この研究課題は(1)に類似しているが飛行速度を一定に保つための方法であり、やはり生物型飛行となる。本年度は昨年度に引き続いてアルゴリズムの検討と改良を行う。
- (3) 動力系故障判断システムの確立と故障容認制御・フォルトトレランス制御
本研究は飛行ロボットの基本設計理念として故障を容認する設計で、故障時にどのようにリカバーするかをあらかじめ設計の段階で配慮することである。これもタフロボットならではの芸当である。本年度は6ロータ・駆動系を5ロータ・駆動系に変換するアルゴリズムの改良を行う。
- (4) セルフチューニング制御による次世代オートパイロットの開発
このシステムは環境変化に適応するシステムの実現で、飛行ロボットの信頼性向上、耐久性向上、安全性向上につながる。本年度は新しいセルフチューニングのアルゴリズムを開発する。
- (5) 複数機の同時飛行によるスワーム飛行、編隊飛行、リーダー・フォロワー飛行
本研究は複数の機体をフォーメーション飛行することで、災害発生時の情報収集の効率化や被災者の探索、物資の搬送などを高効率かつ敏速に行う。本年度は3機のフォーメーション制御を実施する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

- (1) 3次元ビジュアル SLAM を用いた屋内外でのマッピングと自己位置推定・自律飛行制御
本年度はアプローチの検討を中心にハードウェアの作成およびアルゴリズムを開発した。
- (2) オプティカルフローを用いた速度制御と自己位置推定
本年度は基本アルゴリズムの改良を行い、実験での検証も行った。
- (3) 動力系故障判断システムの確立と故障容認制御・フォルトトレランス制御
本年度は6ロータ・駆動系を5ロータ・駆動系に変換するアルゴリズムの改良を行った。
- (4) セルフチューニング制御による次世代オートパイロットの開発
本年度はセルフチューニングの新しいアルゴリズムの開発を行った。
- (5) 複数機の同時飛行によるスワーム飛行、編隊飛行、リーダー・フォロワー飛行
本年度は新しいアルゴリズムの開発と3機のフォーメーション制御を実施した。

2-2 成果

○動力系故障判断システムの確立と故障容認制御・フォルトトレランス制御

本研究では主に駆動系故障に対する飛行ミッション継続について検討した。機体トラブルの発生確率が高いのは経験的に駆動系故障である。なぜなら、小型 UAV において駆動系は自身の重量以上のペイロードを有しながら高出力パワーを出し続けて飛行しており、さらに、突風などの外乱に耐えながら飛行しており過酷な環境下にある。したがって、一般にモータードライバーである ESC (Electric Speed Controller) の寿命は短く、延べ駆動継続時間は高々 50 時間~100 時間程度である。その他、駆動系に関する故障としては回路と部品の経年劣化や発熱等に伴うモータのシャットダウン、飛行中のプロペラ損傷等がある。このような駆動系の故障が発生した際は、機体の姿勢が崩れて墜落する可能性は高くなる。このような事故を回避するためには、機体の各デバイスの状態をリアルタイムで監視していることが重要である。万一、異常が予知できた際は一瞬で故障の種類や危険度を判断し、どのように対処するかについてあらかじめ準備しているシナリオに従って敏速に対策を行うことが重要である。このような駆動系トラブルに遭遇しても飛行ミッションを継続する考え方は有人飛行機では常備されており、フォルトトレランス制御と呼ばれている。本研究ではこの考え方を無人機に適用している。

【故障検知アルゴリズム】

フォルトトレランス性を有するシステムの構成を図 1 に示す。このようなシステムはフェールセーフシステムと呼ばれる。フェールセーフシステムは監視部分と制御器再構築部分に分けられる。この 2 つのブロックの役割は

1. 監視部分はシステムの入出力(入力 , 出力)とシステムの実モデル(Plant)との間で完全に一致していることを前提としている。この部分の出力 f は監視されているシステムの故障情報を含めて制御器再構築部分の入力となる。
2. 制御器再構築部分は故障情報 f を用いて、システムを常に最適な制御系に構築し維持しながら制御し続ける。

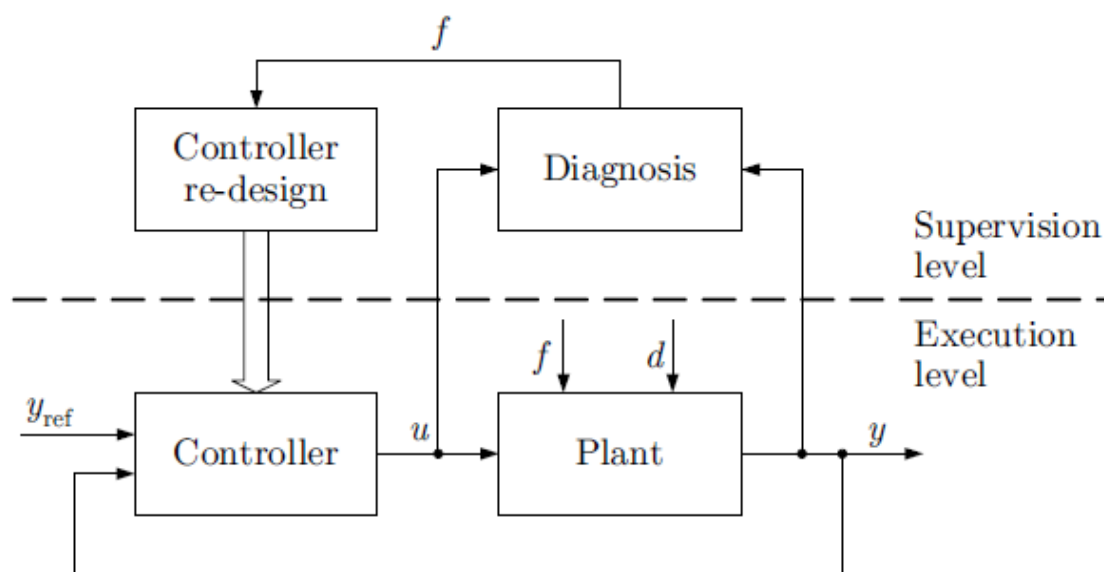


図 1 フォルトトレランス性を有するシステムの構成

駆動系回路の電流値は駆動系が正常であるどうかの状況を調べるパラメータとなっており、モータの異常、プロペラの損傷等が発生した時、電流に異常な変動が発生する。従って、駆動系の電流を用いて異常検知を行う電流モデルベースの故障検知では各センサのデータ処理とデータをベースとした演算は全部異常検知マイコンが担当しており、6個の独立な電流値の計測と故障検知の計算を行う。電流モデルベースの故障検知システムの原理図は図2のように示される。

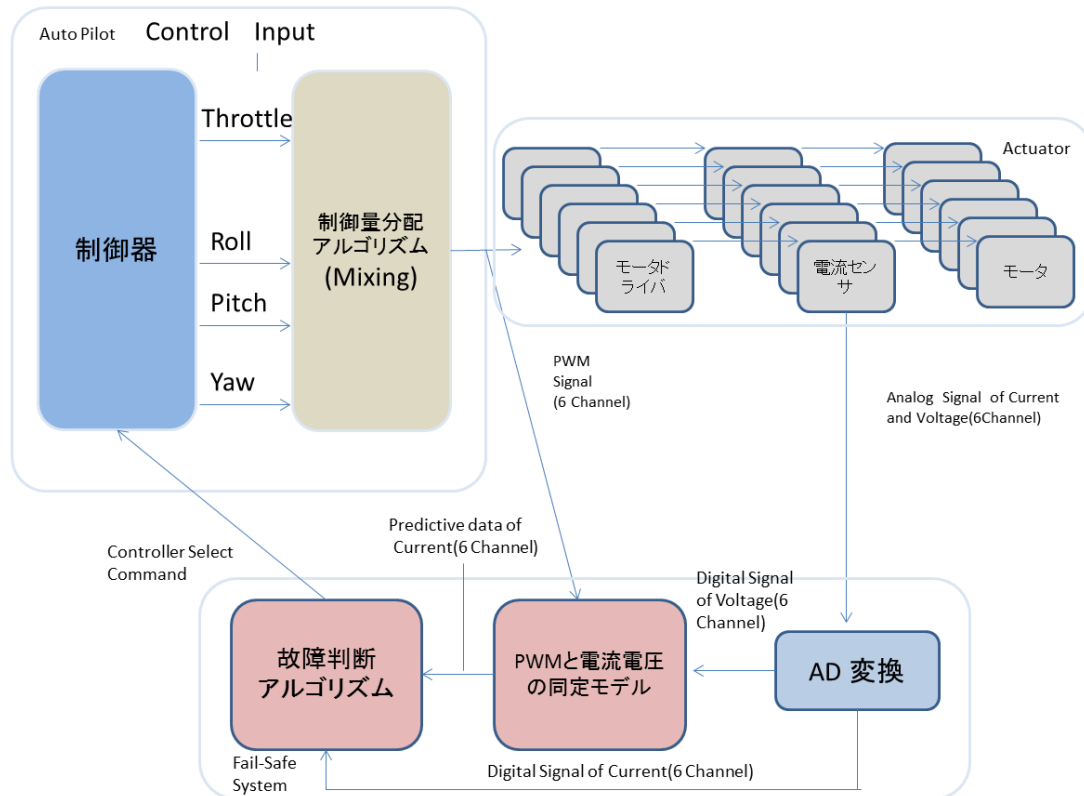


図2 電流モデルベースの異常検知システム

想定している異常はモータおよびモータードライバの故障及びプロペラあるいはロータ損傷の2種類である。電圧と電流および角速度をモータの状態量と設定して、関数 ψ をモータの状態を反映できる関数と定義すれば、 ψ は次式で表せる。

$$\psi(v, i, \omega) = 0$$

モータ故障が発生した場合、モータの係数定常量の変化に伴い、 ψ の値も変化する。また、ロータが損傷した場合には、ロータのトルクが急に変化し、電流が小さくなり、振動が生じる。したがって、関数 ψ は故障診断に役立つと考えられる。一方で、モータの回転数を制御するドライバはPID制御を用いている。また、マイコンから出るPWM信号とモータ回転数の伝達関数の関係は線形である。以上の分析によって、 ψ は以下の式になる。

$$\psi(v, i, \omega) = \psi(v, i, \mu\omega) = \psi(v, i, PWM) = 0$$

逆変換を行うと、次の式のように表すこともできる

$$i = \psi^{-1}(v, PWM)$$

通常の飛行状態においてPWM信号から電流までのモデルを推定できれば、モータとロータの状態について

でも監視することができる。フォトインタラプタはモータの回転数を測定し、電流センサはモータ回路の電流値を測定する。同時にバッテリーの電圧は時間とともに低下するので電流の測定においては、電圧の影響は無視できない。PWM 信号とモータの回転数の関係を図 3 に示す。

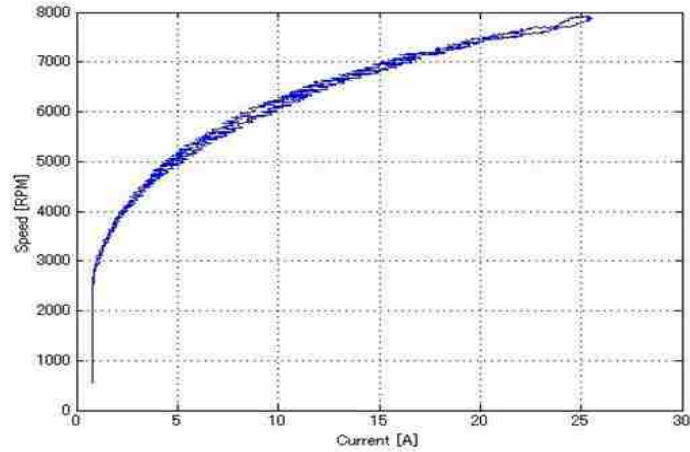


図 3 電流モデル

図 3 より電流とモータ回転数の関係は指数関数によって表され、試行錯誤により関数の未定係数を求めた。

これより、PWM 信号とモータ回転数の線形化係数を求めることによって、 ψ^{-1} を求めることができる。電流規範モデルは次式で表せる。

$$i = \left[\left(\frac{PWM}{3120} \right)^{\frac{1}{0.2596}} + 1.45 \right] \times 235 - 341.1 + (v - 12.2) \times 6.3$$

実験はモータが一定の速度で回転している際に、手でモータに外力を与えることによって、回転数を変化させ、モータ故障時の実験を行った。ここでは、機体がホバリングを行っている場合と上昇及び下降を繰り返している場合の 2 つの状態についてモデル検証を行う。二乗平均平方根法を利用して故障判断を実現する。二乗平均平方根法は次の式の通りである。

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{t \times 200} \Delta I^2}{t \times 200}} \quad \Delta I = I_{Model} - I_{Real}$$

t は飛行時間を表し、故障判断のプログラムは 200 サンプル秒でデータを測定する。モータも故障がない場合は δ は一定の範囲で変動する。故障が発生した場合は、 δ は明らかに振動する。そこで δ の値が上式の条件を満たすとき、故障が発生したと判断する。そして、故障したモータを止めて、飛行維持に必要な

$$\delta \geq \delta_{max}$$

揚力と反トルクを再配置することを行う。この閾値は実験によって決めることができる。

【故障発生時の制御量再分配アルゴリズム】

6 発ロータ型ヘリコプタの制御量はスロットル(Throttle)、ロール(Roll)、ピッチ(Pitch)とヨー(Yaw)の 4 つであり、アクチュエータ(actuator)であるモータは 6 個である。このようなアクチュエータの数量が制御量より多いシステムは冗長システムと呼ばれる。冗長システムの中にはアクチュエータが故障してもシステ

ムを制御することが可能の特性を持っているものがある。6発ロータ型ヘリコプタの制御量分配を図4に示す。制御入力からアクチュエータの制御量分配のアルゴリズムはMixerという部分にあたる。このアルゴリズムは実際の各駆動系の状況によって最適な分配アルゴリズムを用いて機体の姿勢を保つ。

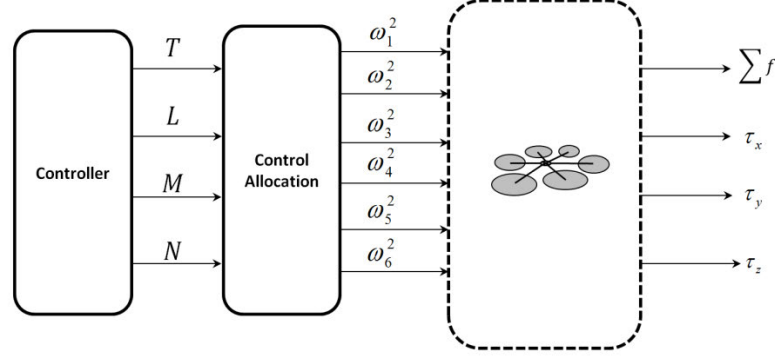


図4 故障時の制御量再分配

制御入力 \vec{u} は

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_{Throttle} \\ u_{Roll} \\ u_{Pitch} \\ u_{Yaw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ L \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad \mathbf{M} \begin{bmatrix} T \\ L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{bmatrix}$$

一方で

$$\overline{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \\ \omega_5^2 \\ \omega_6^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \quad \overline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} f & \kappa & f & \kappa & f & \kappa & \kappa & \kappa_f & \kappa_f \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\kappa_f}{\kappa} f & \frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f f & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f f & -\frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f f \\ \kappa_\tau l & \frac{\kappa_\tau l}{2} & \frac{\kappa_\tau l}{2} & -\kappa_\tau l & -\frac{\kappa_\tau l}{2} & \kappa_\tau l \\ 1 & e_1 \kappa & e_2 \kappa & e_3 \kappa & e_4 \kappa & e_5 \kappa & e_6 \kappa \end{bmatrix}$$

各駆動系の故障要素 η_i は次の式で表される。故障要素 η_i は監視部分の出力によって変わる。

$$\eta_i = \begin{cases} 1, Normal \\ 0, Fail \end{cases}$$

各駆動系の故障状況を含めて

$$\overline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \kappa_f \eta_1 & \kappa_f \eta_2 & \kappa_f \eta_3 & \kappa_f \eta_4 & \kappa_f \eta_5 & \kappa_f \eta_6 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f \eta_2 & \frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f \eta_3 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f \eta_4 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \kappa_f \eta_5 \\ \kappa_\tau l \eta_1 & \frac{\kappa_\tau l}{2} \eta_2 & -\frac{\kappa_\tau l}{2} \eta_3 & -\kappa_\tau l \eta_4 & -\frac{\kappa_\tau l}{2} \eta_5 & \kappa_\tau l \eta_6 \\ e_1 \kappa \eta_1 & e_2 \kappa \eta_2 & e_3 \kappa \eta_3 & e_4 \kappa \eta_4 & e_5 \kappa \eta_5 & e_6 \kappa \eta_6 \end{bmatrix}$$

以上の式を整理して

$$\bar{\mathbf{M}}(\eta_i)\mathbf{M} \begin{bmatrix} T \\ L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}$$

ここで、疑似逆行列を用いて故障時の制御再分配行列を計算する。

$$\mathbf{M} = \bar{\mathbf{M}}(\eta_i)^T (\bar{\mathbf{M}}(\eta_i)\bar{\mathbf{M}}(\eta_i)^T)^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_N \end{bmatrix}$$

以上が、新たに開発したフォルトトレランス制御アルゴリズムである。

2-3 新たな課題など

フォルトトレランス性を有する制御システムは、1つは故障検知部分、もう1つは制御器再構築部分である。故障検知ブロック (diagnostic block) はシステムの入出力を測定しながら実モデル (physical plant) との同一性を検証する。この一致性の結果が故障発生に関する最終判断に対して重要な結果 (パラメータ) を導くこととなる。制御器再構築ブロック (controller re-design block) は故障検知部分からのパラメータを用いて最適な制御器に切り替える。今後は最適な制御器構築に関する検討を考察する。

3. アウトリーチ活動報告

アウトリーチ活動としては、一般社団法人ミニサーベイヤーコンソーシアムがあり、産学官の連携組織として精力的に活動している。ミニサーベイヤーコンソーシアムは2012年に40機関で発足して、2015年春にミニサーベイヤーコンソーシアムネクストとなり、2016年4月に法人化して、一般社団法人ミニサーベイヤーコンソーシアムとして再編された。会長を野波が務めている。現在の会員数は240機関であり、オールジャパンとしての活動を推進している。