

産業用無人ヘリコプタの飛行特性と制御

Flight Characteristics and Control of Unmanned Aerial Vehicle

佐藤 彰*

Akira Sato

要旨

産業用無人ヘリコプタ R-50 の運動解析を行い、自己回帰モデルを用いて動特性モデルを導出した。これをもとにして応答モデルを決定し、モデルフォローイング制御を 4 自由度で行った。モデルは「上級者モード」、「中級者モード」、「初心者モード」の 3 モードを設定し、安定性を損なうことなく、操縦性を操縦者の技量にあわせて変更できるようにした。操縦者の官能評価により、制御性能の評価を行ったところ、初心者から上級者まで満足できるレベルであることが確認できた。また、操縦者の操舵量の周波数分析を行ったところ、制御することにより操舵量が半分以下になることが確認できた。

1 はじめに

当社の無人ヘリコプタ R-50（以下 R-50 と呼ぶ）の普及にともない、いわゆるラジコンマニア以外の人が必要にせまられて、操縦訓練をして免許を取得する機会が多くなった。この時、発生してきた問題が操縦の難しさである。R-50 の操縦は基本的には、ホビー用のラジコンヘリコプタの操縦方法と同じで送信機の 2 本のスティックを同時に微妙に操作して、フライトさせる。（ホバリング時は約 3 mm 以内の動かし量であり、普通の人が考える以上に微妙な操作である。）

ホバリングを行いやすくするためには安定性を増大させるような制御が必要になる。しかし、農薬散布作業を行う時には、かなり急激な操作も必要となるため、操縦性も損なうことは許されない。そこで、R-50 の制御として、SCAS（Stability and Control Augmentation System）を開発することにした。

2 飛行特性の解析

R-50 には、安定性と操縦性の向上のために図 1 のようなベル・ヒラー混合型のスタビライザがついているため、その操縦性、安定性は有人ヘリコプタとは大きく異なる。⁽¹⁾

その飛行特性の解析を、自己回帰モデルを用いて行った。

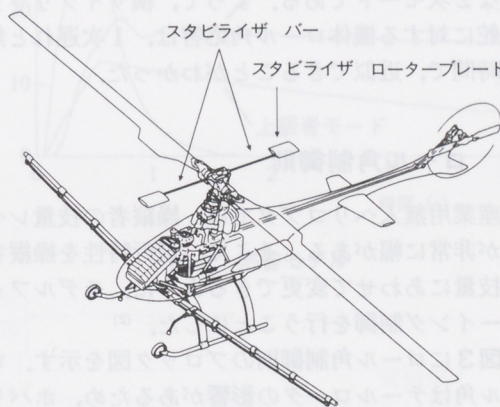


図 1 スタビライザ

$$\phi(t) = \sum_{n=1}^m a_n \cdot \phi(t-n\Delta t) + \sum_{n=\text{lag}}^{\text{lag}+k-1} b_n \cdot \delta x(t-n\Delta t)$$

- ϕ : ロール角
- δx : 横サイクリック角（操縦者入力）
- Δt : データの刻み幅
- m : 自己回帰モデルの項数
- k : 操舵の影響を表す項数
- lag : 時間遅れ

*スカイ事業部 技術開発室

安定したホバリング状態から、一定の横サイクリック角を与えて、機体ロール角の計測を行った。これを前記自己回帰モデル式に従い、分析を行った。

理論計算によると、横方向には2つの振動モードが存在する。1つはスタビライザによって発生する速い周期のモード（以下「スタビライザモード」と呼ぶ）もう一つは、周期の遅いほとんどニュートラルのモードである（以下「長周期モード」と呼ぶ。これらのモードの減衰率と振動数を自己回帰モデル式により計算した。1 deg・secのパルス入力に対するロール角応答は表1のようになる。

（1次および2次モードは長周期モード、3次モードはスタビライザモード）横サイクリック角を与えたときの応答を図2の「ロール角機体応答」に示す。

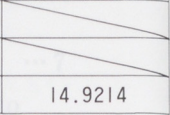
応答特性に大きく寄与しているのは、減衰の小さな2次モードである。よって、横サイクリック操舵に対する機体ロール角応答は、1次遅れと無駄時間で、近似できることがわかった。

3 ロール角制御則

産業用無人ヘリコプタでは、操縦者の技量レベルが非常に幅がある。そこで、飛行特性を操縦者の技量にあわせて変更できるように、モデルフォロ잉制御を行うことにした。⁽²⁾

図3にロール角制御則のブロック図を示す。ロール角はテールロータの影響があるため、ホバリングの中立姿勢角が0 (deg)ではなく、テールロータ推力の逆側に傾く。その推力は、機体の重量やフライト状況によって変動する。そのため、横方向の加速度を検出して中立姿勢角を決めている。

表1 ロールの応答特性

モード	振幅(deg)	減衰(a)	振動数(rad/s)
1次	-0.0560	-42.8520	
2次	4.38634	-0.0374	
3次	4.1411	-1.7738	

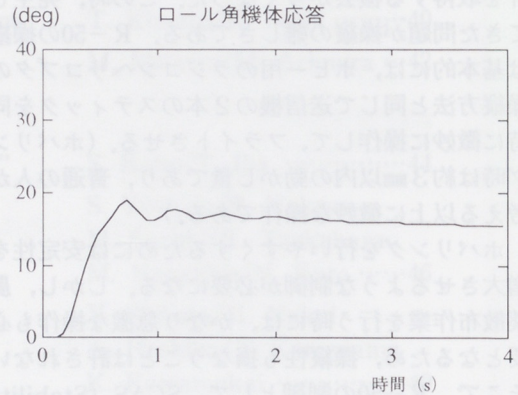
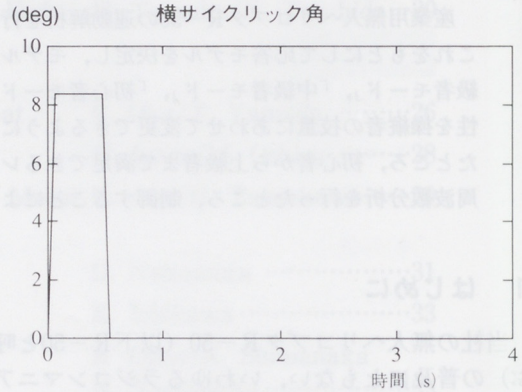


図2 ロール角機体応答

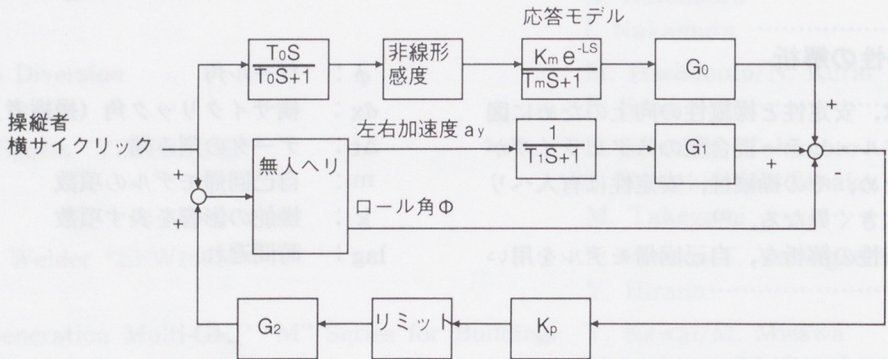


図3 ロール角制御則ブロック図

1 次遅れと無駄時間の応答モデルに追従させ、そのモデルを操縦者の技量によって変更することにした。図 4 に応答モデルを示す。

「上級者モード」は、旋回フライトを行うことのできる経験の豊富な操縦者用のモードである。操縦者は、安定性よりも操縦性を重視する。特に、ロール角の中立への戻りが速いと、旋回中に姿勢を戻されて操縦がやりにくくなるので、大きな一次遅れの時定数とした。

「中級者モード」は、免許保有者の大部分をしめる経験のあまりない操縦者用のモードである。操縦者は、旋回フライトは行わず、常に機体を後方から見ながら、前後左右にフライトさせる。

特に後進フライトは不安定になりやすいので、安定性も必要となる。また、前進から急停止を行う時は操縦性も必要となる。そこで、立ち上がり量を大きくして、また中立への戻りも速くなるように、小さな一次遅れの時定数とした。

「初心者モード」は、まだ免許のない人の練習用のモードである。安定性を重視するために、応答モデル量は 0 として、単なる SAS (安定増大装置) とした。

図 5 に「上級者モード」のフライト結果を示す。モデルと機体応答が良く一致していることが確認された。

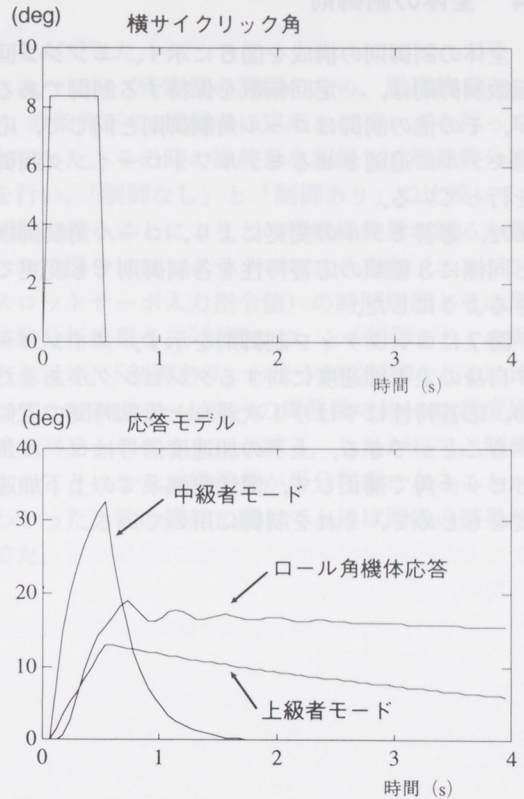


図 4 応答モデル

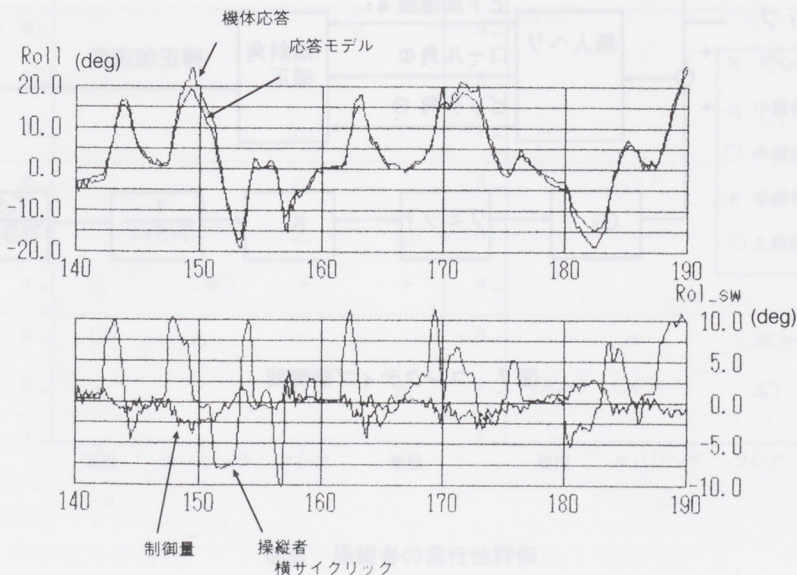


図 5 ロール角制御則フライト結果

4 全体の制御則

全体の制御則の構成を図6に示す。エンジン回転数制御則は、一定回転数を保持する制御であるが、その他の制御はロール角制御則と同じで、応答モデルに追従させるモデルフォロ잉制御を行っている。

また、応答モデルの変更により、ロール角制御則と同様に3種類の応答特性を各制御則でも変更できるようにした。

図7にコレクティブ制御則を示す。メインロータ自身の上下加速度に対するダンピングがあるため、応答特性はやはり1次遅れと無駄時間で近似することができる。上下の加速度信号はロール角とピッチ角で補正して、慣性座標系での上下加速度をもとめて、それを制御に用いている。

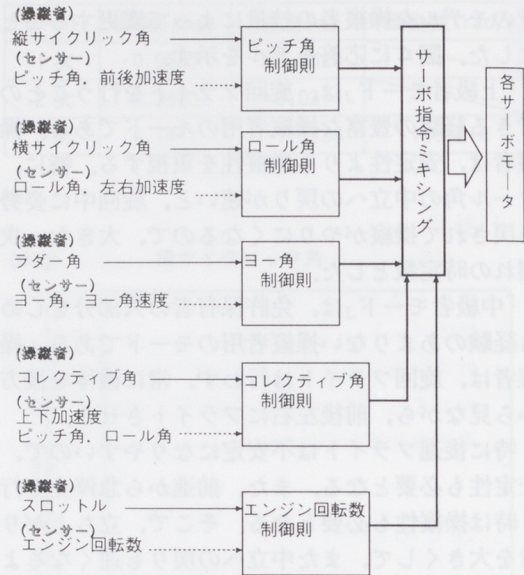


図6 全体の制御則

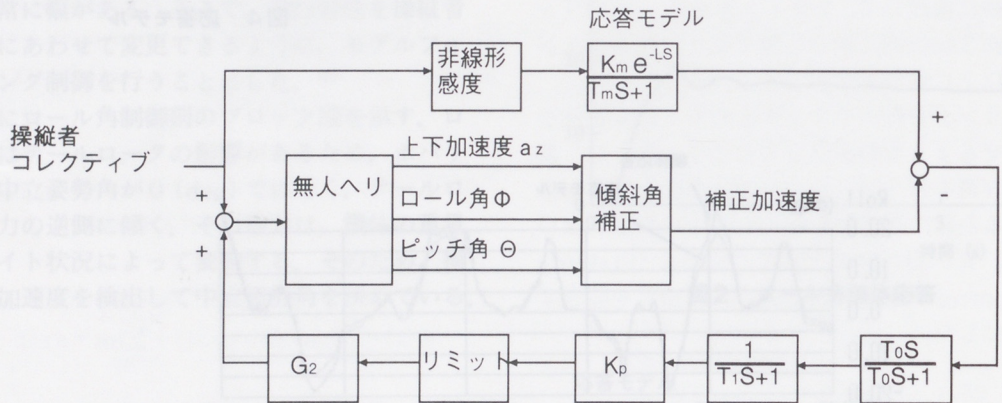


図7 コレクティブ制御則

5 制御性能の評価

5名の操縦者により、飛行性の評価を行った。5名の操縦者のうち、1名は制御装置なしでは操縦できない初心者、3名は旋回フライトのできない中級者、1名はラジコン歴の長い上級者である。離陸から着陸までの一連のフライトパターンにおいて、クーパー・ハーパー・レーティングスケールを用いて、「制御なし」と「中級者モード」の制御の比較評価を行った。(図8参照)

P.R. (パイロット・レーティング) は、値が小さいほど飛行性が良いことを示す。「制御なし」では、「制御不能」の初心者もレベル1「改善なしに満足」になった。また、「制御なし」ではレベル3「改善必要」になった。また、「制御なし」ではレベル3「改善必要」からレベル2「改善すれば満足」の評価をした操縦者も、「制御あり」ではレベル1「改善なしに満足」になり、非常に良い評価をもらう

ことができた。
ホバリング安定性の評価のため、風速約5(m/s)の条件下で、操縦者に定点ホバリングを行ってもらった。その時の操舵量を記録して周波数分析を行い、「制御なし」と「制御あり」で比較して、制御を行うことによりどの程度操舵量が減るか調べた。図9にコレクティブピッチ方向(エンジンスロットサーボ入力指令値)の時間履歴とその周波数分析結果を、「制御なし」と「制御あり」の両方を示す。「制御あり」のほうが「制御なし」に比べて、0.2(Hz)~4(Hz)の周波数で約10db程度操舵のパワースペクトルが減る。したがって、制御することにより、操舵量が半分程度になることがわかった。他の操舵に関してもほぼ同様の結果がでた。

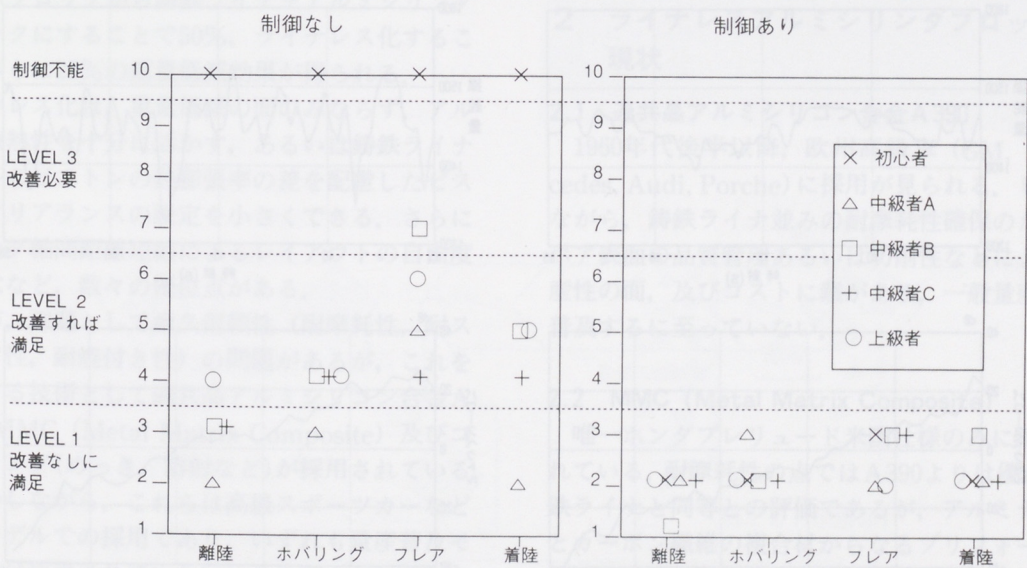


図8 操縦者の飛行性評価

6 おわりに

無人ヘリコプタは、人間が同乗していないが故に有人ヘリコプタよりもある面では、操縦が難しいといえる。しかも操縦者が、ラジコンヘリコプタの全日本選手権出場者から、女性の農業従事者の方まで、その技量レベルや知識には非常に幅がある。どのような操縦者にも本当に満足していただける飛行性能を有する制御システムを構築することは、非常に難しいことである。とくに、いわゆるラジコンマニアの人達は、自分自身の操縦性に対する好みがはっきりしていて、しかもそれが人によってかなりばらついている。しかしながら、今回多くの操縦者に満足していただける制御システムが出来たのではないかと自負している。

今後も産業用無人ヘリコプタの制御装置という、まだまだ未知のことが多い分野の開発を行ってみたい。

参考文献

- (1) 上村誠他：ヘリコプタとCCV，日本航空宇宙学会誌，35(1987)，PP468-PP474
- (2) 加藤寛一郎：CCVの利点と限界，日本航空宇宙学会誌，35(1987)，PP455-PP460

著者



佐藤 彰

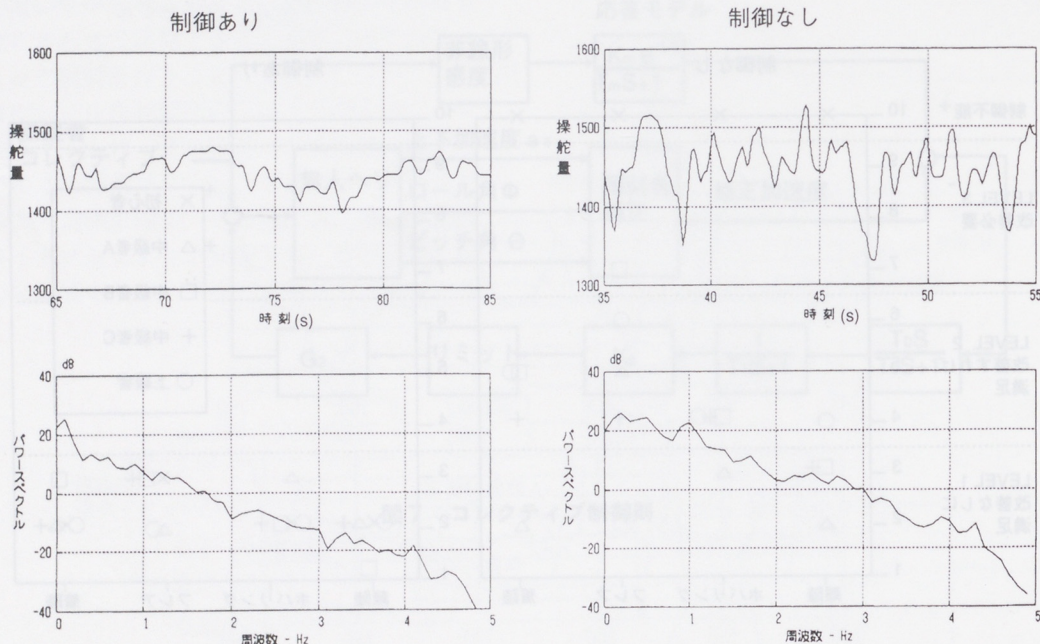


図9 ホバリング時のコレクティング方向操舵量の周波数分析