



夜間・低視程時のホバリングに対する ヘリコプタ操縦性の改善

Improvement of the Handling Qualities During Hover in the Night or Poor Visibility

小 島 徹*¹
Toru Kojima

近年、ヘリコプタのFBW（フライ・バイ・ワイヤ：パイロット操舵を電気信号で伝達する技術）化や、ヘリコプタの飛行制御則の更新に対する研究・開発が盛んに行われている。その目的として操縦性改善によるパイロット・ワークロードの低減があり、ホバリング（空中停止）時の操縦性改善のため、スティックの動きに対応した機体応答の特性を変更することが検討されている。このような新しい技術は、夜間・低視程時など厳しい環境で使用するヘリコプタの操縦性改善・安全性向上につながると期待されている。今回、機体の速度とスティックの動きが比例する“速度コマンド形式”を実現する制御則を設計し、パイロット評価を行った結果、そのような厳しい環境を含め、従来機に対し操縦性改善を示す定性的／定量的な結果が得られた。今後も、更なる操縦性改善・安全性向上を追及し、実機への適用を目指していく。

1. はじめに

FBW技術は、固定翼の世界では今や当たり前となっているが、ヘリコプタの世界では、RAH-66 試作機が1996年に初飛行（2004年に開発中止）、NH90が2006年に量産機納入となっているように比較的最近のことである。また、従来機（FBW以外のメカニカルな操縦系統を持つヘリコプタ）の飛行制御則を更新し、操縦性を向上する Partial Authority FCS（Flight Control System）についても、CH-47Fへの適用に続き、AH-64D、ARH-70への適用が計画されている。

これらの目的の1つに、夜間・低視程時のホバリングにおける操縦性の改善があり、その手法として、スティックの動きに対応した機体応答の特性（これを、“応答形式”と呼ぶ）を変更することが検討されている。従来機の応答形式は、機体の姿勢変化率（レート）とスティックの動きがおおむね比例する、いわゆるレート・コマンド形式に分類される。これに対し、FBW化または Partial Authority FCS化により、機体の姿勢とスティックの動きが比例する姿勢コマンド形式、機体の速度とスティックの動きが比例する速度コマンド形式などの新しい応答形式に変更することが可能である。

これらの応答形式は、パイロットの操縦感覚に影響を与えるため、運用の場面に応じてどの形式を使用す

るか適切に選択する必要がある。これまでの研究から、最適な応答形式は、視界の状況とヘリコプタが行う任務に依存することが分かっており、ヘリコプタの操縦性を規定した最新のスペックである ADS-33E-PRF⁽¹⁾では、ホバリングについては、視界の状況に応じて、下記の応答形式が推奨されている。

- ① 晴れた昼間：レート・コマンド形式
- ② ①と③の間：姿勢コマンド形式
- ③ 夜間・低視程：速度コマンド形式

これらの応答形式の中で、速度コマンド形式は、近年、量産機として CH-47F で初めて採用された方式であり、今後開発される機体では、安全性向上を目的として、その普及が進むと考えられる。

本稿では、夜間・低視程時のホバリングにおける操縦性改善・安全性向上を目的として、速度コマンド形式の制御則の設計を行い、パイロット評価により、有効性を確認した結果をまとめる。

2. 速度コマンド形式の制御則概要

制御則の設計に必要な速度コマンド形式の設計要求を設定するに当たっては、今回の操縦性改善の目的に、ADS-33E-PRFの要求が合致すると判断し、その要求の一部を採用した。以下に代表的な要求⁽¹⁾を示す。

- (1) ステップ入力に対する速度の応答が、一次応答であり、時定数が2.5～5.0(s)でなければならない。

*¹ 名古屋航空宇宙システム製作所ヘリコプタ技術部電子装備設計課

(2) スティックに対して、操舵量と速度の関係は、図1の制限内（水色部分）になければならない。

スティックに対する速度変化について上記(1)、(2)の要求を満足する必要がある一方で、外乱応答の抑制という要求も満足する必要がある。そのため、両者（速度変化と外乱応答）の要求に対し独立に調整が行える、図2の2自由度制御系を採用した。この制御系は、フィードフォワード・コントローラとフィードバック・コントローラの2つからなり、それぞれ以下の役割がある。

(a) フィードフォワード・コントローラ：機体近似逆モデル部で、アクチュエータの逆モデル及び機体運動の逆モデルを使用して、アクチュエータを含めた機体の運動を打ち消し、目標コマンド・モデル部により生成された目標機体応答に、実際の機体応答を近づける。なお、アクチュエータ及び機体運動モデルは非常に複雑であるため、簡略化したモデルを使用している。

(b) フィードバック・コントローラ：目標機体応答と機体応答の偏差がゼロになるように制御を行い、外乱の抑制や(a)の簡略化したモデルの影響低減を行う。

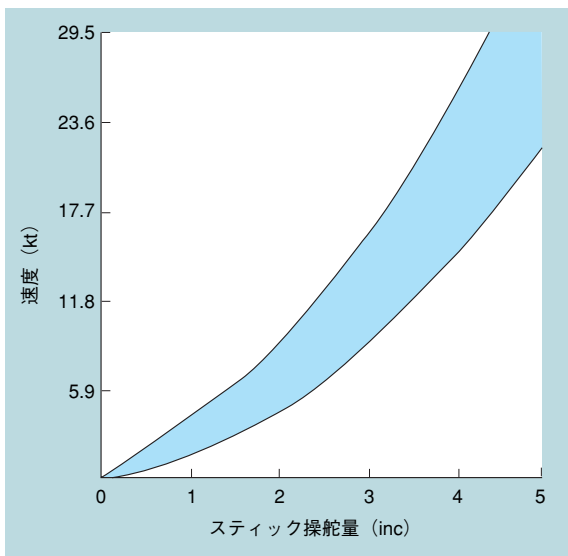


図1 操舵量と速度の関係⁽¹⁾

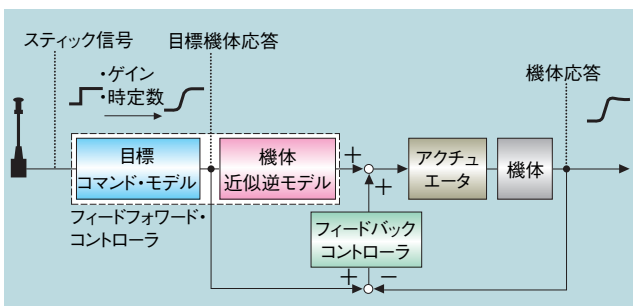


図2 速度コマンド形式の制御則概要

3. パイロット・シミュレーション試験

夜間・低視程時のホバリングにおける操縦性評価を行うため、ドーム型シミュレータにてパイロット・シミュレーション試験を行った。

(1) 評価タスク

ホバー・タスク⁽¹⁾

評価目的：アプローチから安定したホバリングへの遷移能力（正確さ、速さ）の確認、正確な位置、機首方位、高度を維持する能力の確認

飛行方法：対地速度6～10kt、高度20ft未満でマニューバを開始し、目標ホバー・ポイントへ向けて右45°で進入し、目標ホバー・ポイント上でホバリングを確立する。試験コースを図3に示す。

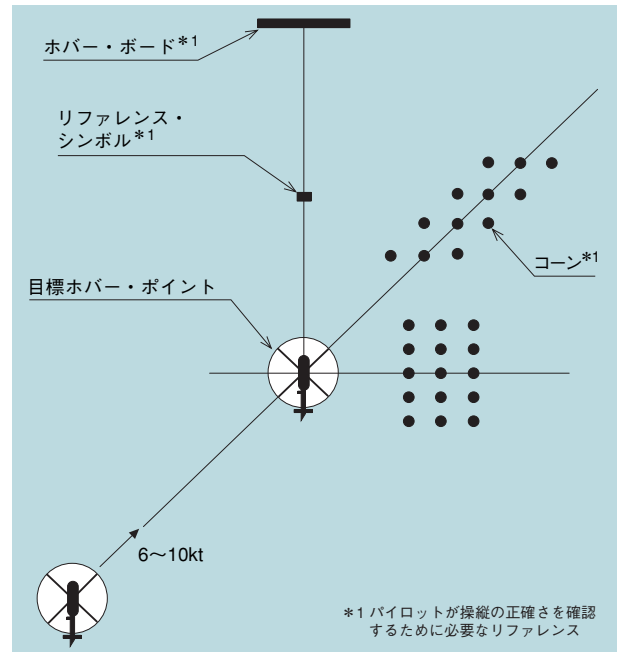


図3 ホバー・タスク試験コース⁽¹⁾

(2) 評価方法

シミュレータの視界を薄暮、視程200mを模擬して、ホバー・タスクの評価を行った。

(3) 試験結果

速度コマンド形式の操縦性に大きな影響を与える目標コマンド・モデル部のパラメータについては、本試験にて絞込みを行い、最終決定を行った。

その決定したパラメータにより、速度コマンド形式の操縦性の評価を行い、パイロットによる10段階評価で操縦性が最もよいLevel 1（与えられたタスクを正確に簡単に行えることを意味する）となることを確認した。その時の試験データを図4に示す。

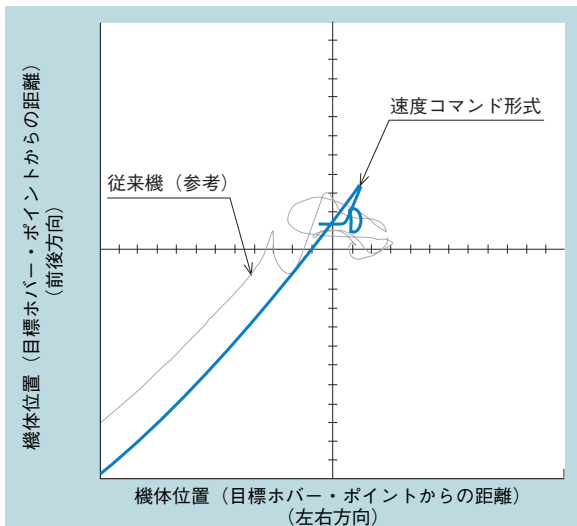


図4 ホバー・タスク評価結果

目標ホバー・ポイント付近で安定したホバリングを確立することができている。また，“夜間でも安心して手が離せる”，“位置の微調整が簡単にできる”とのコメントもあり，操縦性が向上していることが確認できた。

(4) 従来機，姿勢コマンドとの比較

速度コマンド形式の有効性を確認するため，従来機（レート・コマンド形式）及び姿勢コマンド形式との比較を行った。なお，本試験は，視界として晴れた昼間を模擬して行った。

● 定性的評価

操縦性について，パイロットによる10段階評価を行った結果，従来機（レート・コマンド形式）→姿勢コマンド形式→速度コマンド形式の順で改善されることを確認した。

● 定量的評価

操縦性の比較を定量的に行うため，定性的評価でパイロットが指標としている操縦の正確さ，ワークロードに関するデータの解析を行った。操縦の正確さは，パイロットが操縦の目標としている目標ホバー・ポイントからの距離（ずれ量）を解析し，また，ワークロードについては，パイロットが操縦するスティックの動き（操舵量）に差が表れると考え，解析を行った。ホバリングへの減速操舵開始から安定したホバリングを30秒間継続した時のデータについてRMS（Root Mean Square）値を比較した結果を，それぞれ図5，図6に示す。

図5，図6より，従来機（レート・コマンド形式）→姿勢コマンド形式→速度コマンド形式の順で，目標ホバー・ポイントからの距離，スティックの操舵量のRMS値が小さくなっており，速度コマ

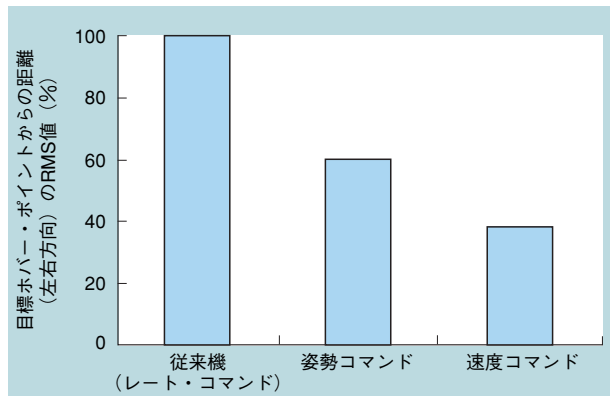


図5 目標ホバー・ポイントからの距離 (RMS 値) の比較

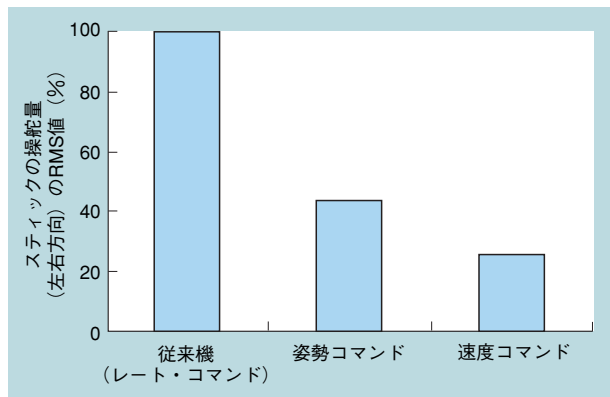


図6 スティックの操舵量 (RMS 値) の比較

ンド形式は，従来機（レート・コマンド形式），姿勢コマンド形式に比べ，少ない操舵量で正確なホバリングを達成できるといえる。

また，操縦の正確さである目標ホバー・ポイントからの距離のRMS値（図5）については，パイロット判断により変化する減速操舵開始のタイミングが影響を与えている。このタイミングを目標ホバー・ポイントから減速操舵開始位置までの距離として示すと，図7となり，従来機（レート・コマンド形式）→姿勢コマンド形式→速度コマンド形式の順で距離が短くなっている。

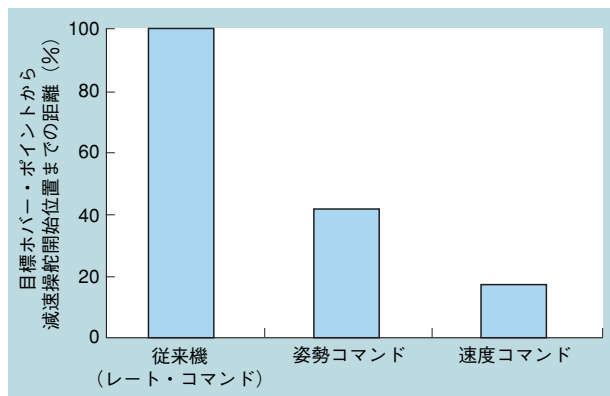


図7 減速操舵開始位置までの距離の比較

距離が短いということは、ホバリング遷移のための操縦を、速く正確にコントロールできていることを意味するため、このことから、ホバリング遷移の操舵の難易度が、従来機（レート・コマンド形式）→姿勢コマンド形式→速度コマンド形式の順で下がっているといえる。

以上の定性的／定量的評価結果から、速度コマンド形式が、操縦性改善につながる有効な制御則であることが確認できた。

4. ま と め

本稿では、夜間・低視程時のホバリングにおける操縦性改善・安全性向上を目的として、速度コマンド形式の制御則の設計を行い、パイロット評価により、そのような厳しい環境を含め、従来機に対し操縦性が改善されることを定性的／定量的に示した。

今後は、本制御則の適用範囲を広げるため、洋上のように目標ホバー・ポイントが定点に固定されないホ

バリングにも有効な制御則へと拡張していく予定である。

また、更なる操縦性改善・安全性向上を追及し、例えば、ケアフリー・マニューバ技術（運用制限超過を事前に予測してパイロットに伝達することにより制限超過を防止する技術）との融合などの検討を進め、実機への適用を目指していく。

参 考 文 献

- (1) ADS-33E-PRF, Aeronautical Design Standard Performance Specification Handling Qualities of Requirements for Military Rotorcraft (2000)



小島 徹