

## 21 モンテカルロ・シミュレーションによる飛行制御系の統計的な評価と設計

宮沢 与和<sup>1)</sup>

### Stochastic Approach for Flight Control System Synthesis and Analysis with Monte Carlo Simulation

Yoshikazu Miyazawa, Flight Division, National Aerospace Laboratory

#### ABSTRACT

This paper discusses a stochastic approach for flight control system synthesis and analysis. A flight simulation model contains various kinds of uncertainty parameters, which make the flight control system's performance uncertain in the development. In the approach, stochastic properties of the parameters are assumed, and then probability of the performance, or probability of mission achievement, is evaluated by using Monte Carlo simulation. Adjustable gains in the flight control law are tuned by maximizing the probability of mission achievement.

#### 1. はじめに

「飛行力学と制御」の分野においては古くからシミュレーションを用いて設計の評価が行われている。特に有人機では、人間パイロットというモデル化しにくい要素を含むため、実際に人間をループの中に入れて評価する必要があり、機体の振る舞いを忠実に実現する飛行シミュレータが求められた。飛行のシミュレーションは今日急速に進歩している自動飛行制御システムの設計・評価においても同様に重要である。数値モデル化された自動飛行制御と機体の振る舞いは、様々なケースを短時間に繰り返し評価することができる。開発にともないシミュレーションの重要性が増しているが、特に最近の技術として統計的な評価が注目されている。モンテカルロ法を用いて、すなわち誤差や変動をその統計的な性質に応じた頻度で発生させて飛行シミュレーションをおこない現実起こりそうな確率を予測する方法である。さらにそのシミュレーションの結果を用いて設計を改良する、たとえばミッションを達成する確率を最大とするような設計パラメータを求める設計問題の取り組みが行われている。

宇宙往還機のように新しい領域の飛行にいきなり挑戦するような機体の開発においては、特にこのような統計的なアプローチの役割が大きい。自動飛行制御システムは想定される様々な誤差に対して健全であることが要求されるが、空力誤差や環境条件などすべての最悪ケースを組み合わせた場合でも飛行可能な機体を実現するのは不可能である。実際にはこのような組み合わせが実現する確率は極めて小さく、現実的な設計としてミッション達成確率が許容される値以上であることが要求される。

図1は不確かさを含む飛行シミュレーションの概念を表したものである。飛行シミュレーションは時間を独立変数とする微分方程式によって表された各部分のモデルにより構成され、それ自体は確定的である。モデルは不確かなパラメータを含み、この確率を定義すれば、飛行の振る舞いの不確かさについてもその統計的性質を調べることができる。さらに飛行シミュレーションの

モデルには搭載プログラムが含まれ、その中には飛行制御ゲインなど設計者が調節できる設計パラメータがある。飛行シミュレーションの結果は、無事滑走路に着陸できるかなど、設計要求を満足するかどうかで評価する事ができる。この不確かなパラメータと調節できるパラメータをまとめて扱えば、これらと評価結果との間の関係を飛行シミュレーションによって調べる事ができる。

#### 2. 検討例

既に飛行実験を終えている小型自動着陸実験 (ALFLEX) を例題として最適化手法の検討を行っている。図2はその結果の一例である。着陸性能を表す接地時の速度と沈下率について1000回のモンテカルロシミュレーションをプロットしている。実際に飛行実験で使用した誘導制御則とすべての要求を満足する確率を最大化することによって導いた結果とを比較している。空力、センサ、操舵駆動系などの特性誤差や環境条件の変動など約100個のパラメータが確率変数である。設計の調節パラメータはこの例では7個である。仮定した誤差モデルについての議論ではあるが、最適化した結果は実験の信頼性向上に役立つことが分かる。

実際の設計サイクルの中で本手法を用いる場合に計算時間が問題になるが、一つの解決方法として分散処理によって対処している。この計算例では、8台のEWS (CPU16個) をスレーブ計算機として接続構成した分散処理システムで処理した。

#### 3. まとめ: 今後の発展への期待

統計的な方法による飛行制御系の評価と設計は、計算の低価格化にともない設計現場において普及していくと思われる。空力や構造などの分野も含めて不確かさが定量化されたモデルを構築すること、不確かさと性能の関係をシミュレーションで評価することがポイントである。不確かさが性能に影響する場合、また反対に精度が必要ない場合を明確にし、設計を緻密かつ効率良く進めることができる。

飛行制御の分野においては1980年頃を境にアナログから

<sup>1)</sup> 航空宇宙技術研究所

デジタルへの移行が行われたが、飛行制御の自動化、特にソフトウェアの進歩はまだ始まったばかりで、今後の発展に大きな可能性が秘められている。乱暴な言い方をすれば、これからの搭載計算機はどんなに優れたパイロットをも越えた適応能力を具現するだけの可能性を持っており、その実現に向けた取り組みが求められている。搭載計算機の有り余る能力を活用するという点において従来の手法には限界があり、さらなる挑戦が必要である。その挑戦の一つの糸口がここで紹介した統計的な評価と設計である。なぜ、パイロットが学習して技量を向上させていくことができるか？様々なミッションや条件に対して新しい操縦をみ出し調節を繰り返してその性能を向上させるからである。線形システムであれば限られた代表に対する設計で済まされるが、対象は線形でもなく、誤差、外乱、故障など様々な状況に対してどう対処すれば良いかは、あらゆる複合されたケースを調べるということにつぎ。しかし、変数の次元に対して調べるケースが指数関数で増大するため、起こりそうなことを多数のシミュレーションを行って評価するという統計的な取り扱いが必要になってくる。ここで紹介した取り組みは初歩的なものであるが、モンテカルロ飛行シミュレーションは適応、学習、創発といったコンセプトを取り込

むことによって新しい時代を切り開く糸口になると期待している。

References

- 1) Motoda, T., Miyazawa, Y., Ishikawa, K., and Izumi, T. "Automatic Landing Flight Experiment Flight Simulation Analysis and Flight Testing," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 36, No. 4, July-August 1999.
- 2) Miyazawa, Y., Motoda, T., Izumi, T. and Hata, T. "Longitudinal Landing Control Law for an Autonomous Reentry Vehicle," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 22, No. 6, November-December 1999.
- 3) Miyazawa, Y. and Motoda, T. "Stochastic Gain Tuning Method Applied to Unmanned Space Vehicle Flight Control Design," AIAA 99-4309, AIAA GNC Conference, Portland, August 1999.
- 4) Motoda, T., Stengel, R. and Miyazawa, Y. "Robust Control System Design using Simulated Annealing," AIAA 2000-4557, AIAA GNC Conference, Denver, August 2000.

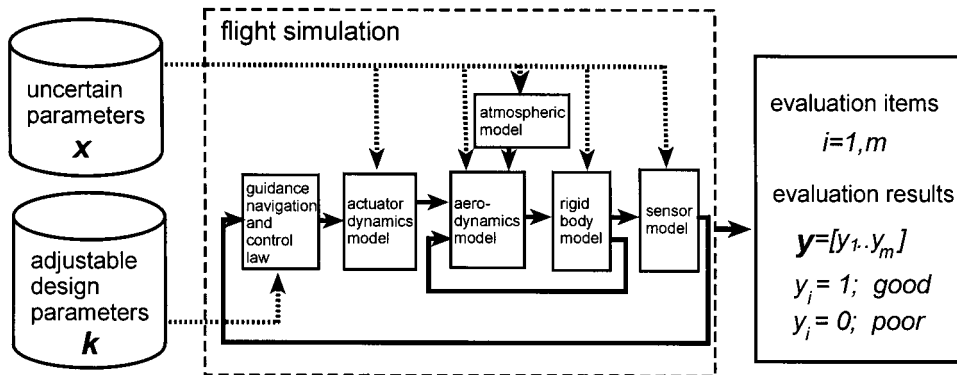


図1 飛行シミュレーション

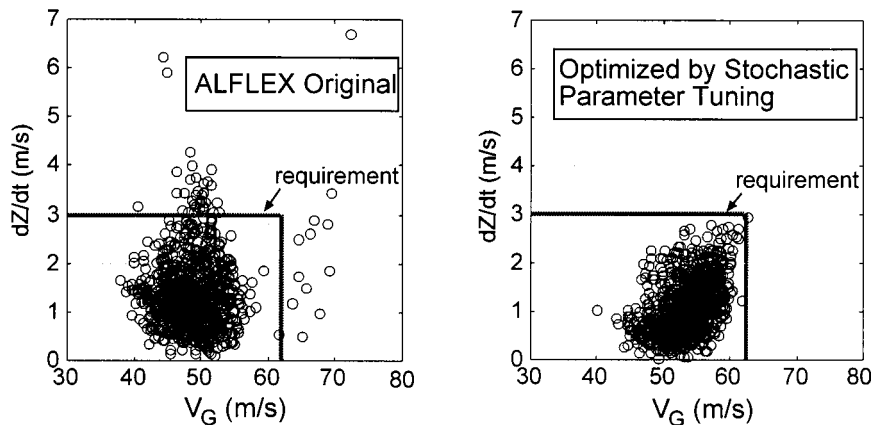


図2 接地時の速度と沈下率