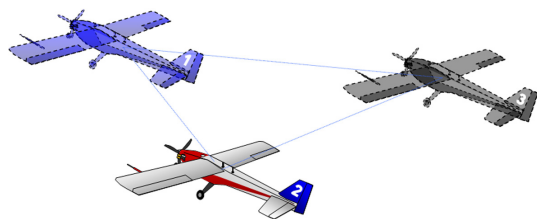


複数機群の編隊協調制御技術の開発及び飛行実証

Development and Flight Test of Multi Aircrafts Coordination Control Technology



増子 洋一郎^{*1}
Yoichiro Masuko

藤井 秀登^{*2}
Hideto Fujii

航空機の運用は、増加の一途をたどっており、また無人航空機の運用も本格化してきている。多種多様な航空機が同じ空間に共存する時代が到来しつつあり、航空機の運用における安全性の確保と効率化が問題となってくる。このような問題に対し、当社では航空機同士がネットワークを結ぶことによって、複数の航空機を“群”として扱う群協調制御技術の研究を進めている。今回、この技術を小型飛行実証機に適用し、3機(実小型飛行実証機1機及びシミュレータ上の仮想小型飛行実証機2機)による自動フォーメーション飛行試験を実施したので、これを紹介する。

1. はじめに

航空機飛行制御システムは、航空機の飛行安全を第一に、安定性、飛行性の要求を満足するように設計する。しかしながら、航空機の運用については、パイロットや航空管制に依存しているのが現状である。

当社では、航空機同士がネットワークを結ぶことによって、複数の航空機を“群”として扱う群協調制御技術に関する研究を進め、開発した群制御アルゴリズムによる2機による自動フォーメーション飛行試験を既に実現し、紹介している⁽¹⁾。今回、先に紹介したアルゴリズムより汎用性が高く、かつ実装に当たって計算負荷を軽くした群制御アルゴリズムを開発し、3機以上の複数機への適用を可能とした。さらに、本アルゴリズムの検証のため、1機の小型飛行実証機と2機の仮想小型飛行実証機を用いた3機による自動フォーメーション飛行試験を実施した。本稿では、開発した飛行制御システムと飛行試験結果について紹介する。

2. 飛行制御システム

2.1 システム構成

小型飛行実証機は、市販の無線操縦システムをベースにし、これに飛行制御装置を搭載する。搭載する飛行制御装置は、飛行制御コンピュータ、慣性センサ、エアデータセンサ、GPS受信器、舵角センサ、データ通信装置、電源から成り、小型飛行実証機の飛行制御を実現する。小型飛行実証機の主要諸元は、全長約2500mm、全幅約2700mm、全備重量約14kg、主翼面積約1.2m²である。外観を図1に示す⁽¹⁾。

また、地上に、飛行状態を監視・制御するための計算機及びデータ通信するためのデータ送受信装置、仮想小型飛行実証機のシミュレーションを実施するための機体運動シミュレータ、及び群制御アルゴリズムを処理するための計算機からなる地上局を設置する。外観を図2に示す。

*1 航空宇宙事業本部防衛航空機事業部航空機技術部主席技師

*2 航空宇宙事業本部防衛航空機事業部航空機技術部

機体運動シミュレータは、仮想小型飛行実証機2機分のシミュレーションを実施する。具体的には、小型飛行実証機の空力と小型飛行実証機に搭載するセンサや計算機の特性を模擬し、小型飛行実証機に搭載する飛行制御則と全く同じアルゴリズムを計算する。

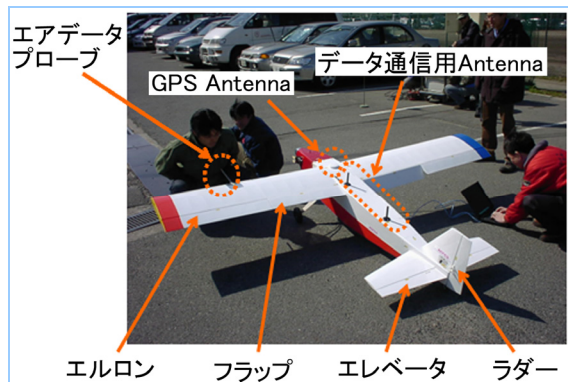


図1 小型飛行実証機外観

図示の機器のほか、機体内部に飛行制御コンピュータなどを備える。



図2 地上局外観

本地上局により、飛行状態の監視や仮想小型飛行実証機のシミュレーション、群制御アルゴリズム処理を実施する。

2.2 飛行制御則

飛行制御則は、機体の飛行性・安定性を一定に保つための安定化飛行制御則とその安定化飛行制御則に対して、加速度指令などを出すための群制御則から構成される(図3)。

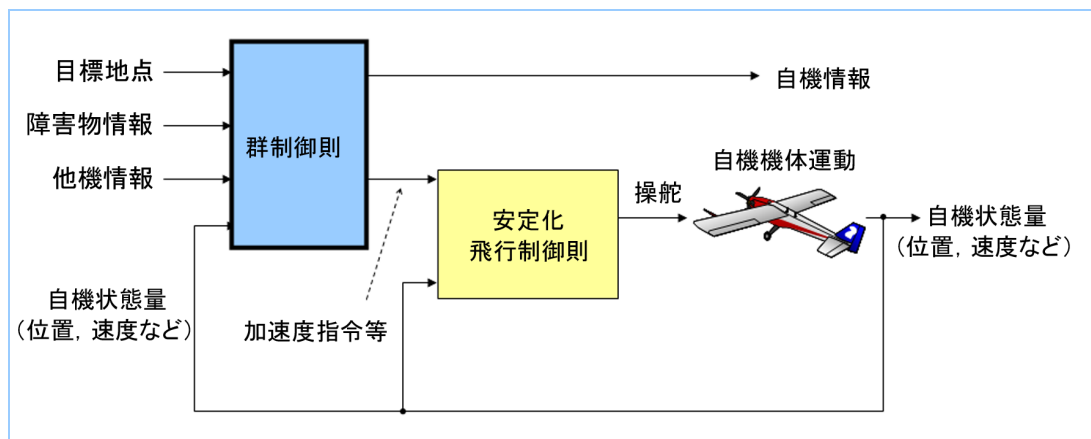


図3 飛行制御則構成概要

安定化飛行制御側と群制御則から成り、機体運動を制御する

2.2.1 安定化飛行制御則

安定化制御則は、飛行条件によらず機体の応答特性や安定性を常に一定にする様、各種センサ情報を用いて水平尾翼、エルロン及びラダーの舵角指令信号を出力する。本制御則は、 H_{∞} 制御理論を適用し設計している。地上からの操縦方式は、①安定化飛行制御則を介さない方式(RC方式)、②安定化飛行制御則を介す方式(FBW方式)を地上からの指令によって選択することが可能である。ただし、FBW方式を選択中に飛行制御コンピュータが故障を検出した場合は、飛行安全を確保するため自動的にRC方式に切り替わり、その情報は地上局に伝えられ、試験を中断することになっている。

2.2.2 群制御則

航空機群の協調制御においては、機体単体に課せられた制約条件(高度、速度、障害物など)を満足しつつ、航空機群を最適に制御することを目指す。当社では、2機による自動フォーメーション飛行試験を既に実施している⁽¹⁾が、当該手法の延長線にて3機以上の複数機を協調制御しようとする、ロジックが飛躍的に複雑となり、実現困難となる。

これを解決するため、今回開発した群制御則は、モデル予測制御理論の考え方を適用した。

具体的には、障害物情報、他機の位置、速度などの情報と自機情報を用い、かつ自機の旋回能力や加速度性能などの機体単体としての制約条件を用いて、将来とるべき軌道を予測し、その予測軌道に基づいた加速度指令などを安定化飛行制御則に出力することとした。この予測制御の手法適用により、制約条件を行列形式で表現可能となり、この制約条件行列を拡張することで航空機群中における機体数の増加に容易に対応可能となった。

ただし、モデル予測制御理論そのものは、制約条件が多くなるにつれて解を算出するための計算負荷が極めて高くなるため、計算処理速度を上げることが難しい。しかしながら、機体の飛行を制御するためには、実時間での処理が要求されることから、アルゴリズムの処理負荷を軽減する必要がある。また、評価関数の設定と制約条件によっては飛行中に解無しの状態に陥る問題を持っている。したがって、飛行安全を確保するためには、本問題を解決する必要がある。そこで、当社では、単純に評価関数及び制約条件行列を拡張せず、航空機の運動に即した形式とすることにより、近年実機に使用されているような計算機で処理できる程度まで処理負荷を軽減し、かつ解無しの状態に陥ることを防止したアルゴリズムを開発した。なお、当社が所有する小型飛行実証機は小型であるが故、実機に使用されているような計算機を搭載することができないため、群制御則を実現するアルゴリズムは、地上局の専用計算機で処理し、その結果をデータ通信装置経由で小型飛行実証機に送信する。群制御アルゴリズムに必要とされる各種情報は、小型飛行実証機からデータ通信装置経由で受信する。

3. 飛行試験結果

飛行試験は、幾つかのステップに分け、飛行安全を確認しながら実施した。自動フォーメーション試験は、以下に示す2ケースを実施した。

- (1) トライアングル編隊形状を維持し、8の字経路を飛行する(図4(a))
- (2) (1)に加え、飛行経路上に仮想障害物を設定し、編隊形態を可能な限り維持しつつ障害物を回避しながら飛行する(図4(b))

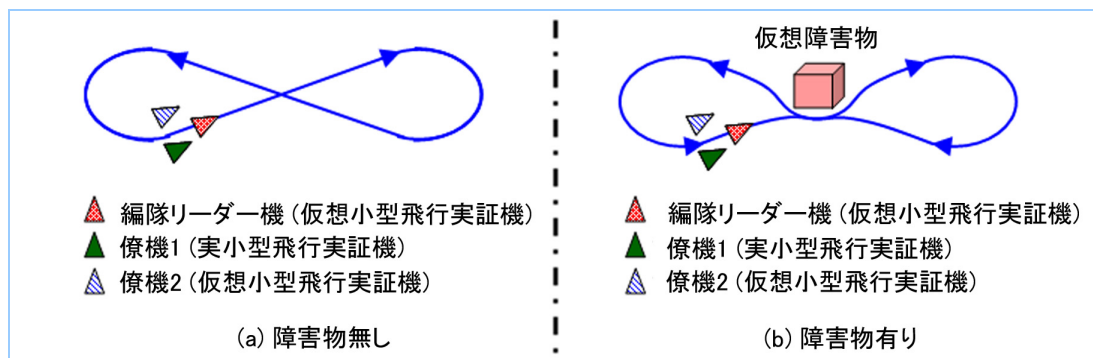


図4 飛行試験ケース

(a)及び(b)の両ケースとも、トライアングル編隊飛行を実施。(a)は障害物無し。(b)は障害物有り。

飛行試験結果を図5に示す。

(1), (2)の飛行試験中は、実小型飛行実証機のみが風の影響を受けることで編隊保持精度が低下する事象が見受けられたが、群制御則設計時に制約条件として組み込んだ、機体間最低距離などの制約条件を割り込むことなく、機体間の衝突も発生しなかった。また、群制御則設計時に想定したとおりに、計算負荷の増加や解が存在しないことにより飛行制御処理が破綻するような状況も発生することなく飛行を継続した。

(2)の飛行試験ケースでは、地上局への指令により飛行経路上に仮想障害物を設置し、群制御則が仮想障害物情報をリアルタイムで組み込み、編隊形態を維持しつつ自動で仮想障害物を回避することを実証することができた。将来的には、レーダなどによって障害物などの情報を自ら収集し、自らの判断で障害物を回避することも可能になるであろう。

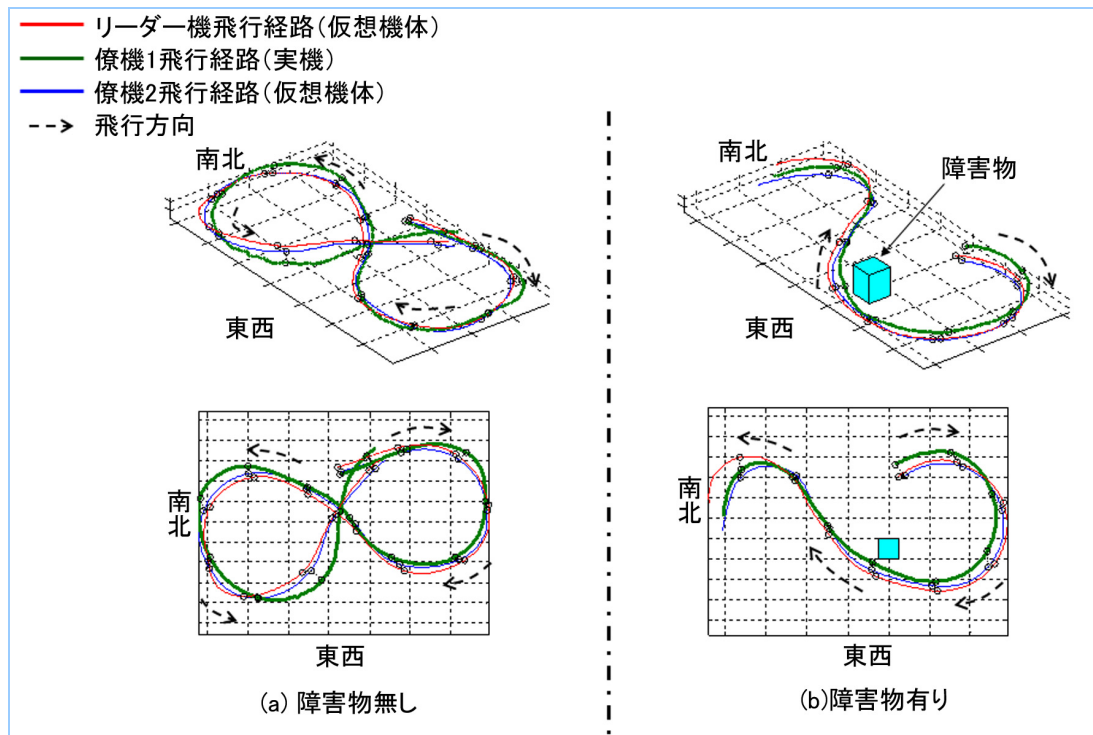


図5 飛行試験結果

(a)及び(b)の両ケースとも、各機体が衝突することなく飛行することができた。

(b)においては障害物との衝突も回避した。

4. まとめ

群協調制御技術の適用例として、群制御アルゴリズムを適用した3機(実小型飛行実証機1機及びシミュレータ上の仮想小型飛行実証機2機)による自動フォーメーション飛行実証試験を行い、所望の結果を得ることができた。今後、さらに制御性能向上させる一方で、より多数の機体を制御するための改良を進め、実用化を目指す。本研究の実用化のためには、航空機間情報ネットワークの信頼性の向上が不可欠であり、これも重要な課題である。

防衛省が先頃発表した“将来の戦闘機に関する研究開発ビジョン⁽²⁾”を鑑みれば、当社が進めている群協調制御技術は、航空機の飛行制御システムにとって不可欠なものとなるであろう。さらには、地上や海、宇宙までも含めた移動体間同士で情報ネットワークを結ぶことで、全ての移動体の安全な運用が可能になるようなればと夢は広がる。

参考文献

- (1) 増子洋一郎, 航空機群の協調制御に向けて, 三菱重工技報 Vol.42 No.1 (2005) p.20
- (2) 防衛省 将来の戦闘機に関する研究開発ビジョン(平成 22 年8月 25 日)
http://www.mod.go.jp/j/press/news/2010/08/25a_02.pdf