

論文の内容の要旨

論文題目 Heuristic Path Planning of Aircraft Formations (航空機編隊のヒューリスティックな経路生成)

氏 名 日野 琢磨

近年、航空旅客需要は増加の一途を辿っており、それに伴い航空機による二酸化炭素を始めとする温室効果ガスの排出量も増加している。一方で、環境への配慮という観点から、この増加を食い止めなければならないことは、議論の余地がない。そのために、現在新しい技術の開発・導入や、効率の良い運航方法の検討・実施など、多方面からアプローチが行われている。検討が行われている運航方法の一つに、航空機を渡り鳥の群れのように相対位置を厳密に制御した編隊を形成させて飛行させる方法、すなわち編隊飛行、がある。これは、編隊飛行を行うことにより、航空機に働く空気抵抗が減少し、同一速度で飛行するのに必要なパワー（従って単位時間あたりの燃料消費）が小さく済むことを利用して、使用される燃料・エネルギーの総量を減らすことが出来ることを狙ってのことである。また、無人航空機に編隊飛行を適用した場合、旅客機をはじめとした有人機と同様の省エネ効果が見込まれるほか、複数機を同時に運用することにより、

- 1) 機体を喪失しても、他の機体がミッションを継続出来ることによる、ミッション実施可能性の向上、
- 2) ペイロードを複数機に分散し、協調してミッションを行うことにより、単機では実現出来なかった複雑、あるいは高度なミッションの実現、などの利点がある。

編隊飛行に関するこれまでの研究は、編隊飛行を行う機体間に働く空気力の推定、計測や、航空機間の相対距離を如何に制御するか2つの分野に集中している。逆に、実際にどのように航空機の編隊を運用するか、特に別々に離陸した複数の航空機のうち「どの機体をどのタイミングで合流、あるいは分岐させるのか」（これを、本研究では「編隊経路のトポロジー」と呼ぶ）の選択、ならびにどこで合流・分岐させるべきかの最適化手法についての検討はほとんどなされていないのが現状である。

このことを受けて、本研究では先に述べた、編隊経路に関わる事項を、素早く、かつ視覚的に判断する手法の提案を行った。視覚的に判断することを手法に要求として課した理由は、無人、有人を問わず、現在航空機を運用しているのは人間であり、人間が判断の過程のいかなる段階でも何が起きているのか理解し、そして介入できるようにするためである。また、類似の事例として、旅客機に管制官が編隊飛行を行うことを打診しても、パイロットが拒否することも十分あり得る。よって、手法の提案を行う際には、最も効率の良い編隊経路のトポロジーのみを提案するのではなく、誰がどんなタイミングでいかなる判断を下したとしても、効率の悪い（単独飛行よりも燃料・エネルギー消費の多い）編隊経路のトポロジーを提案しないよう、気をつけた。

本研究で扱う問題は、グラフ理論の著名な問題であるシュタイナー木問題 (Steiner Minimal Tree Problem, SMTP) の亜種に当たる。本研究で扱う問題の最大の課題は、SMTP同様、問題を解き始める時の編隊数の増加に伴い、編隊経路のトポロジーが超指数関数的に、オーダーで言えば $O(2^n)$ で増加することにある。

例えば、初期の編隊数が3つの場合は、編隊経路のトポロジーは19種類と、総当たりが可能な数であるが、これが4つだと691種類、5つだと54746種類と、とても総当たりによって問題を解くことが不可能になる。これら多数の編隊経路のトポロジーの中から如何に効率の良いものを素早く選ぶかが、本研究で扱う問題を解く上では最も重要である。

この時、1) 航空機の単位時間当たりの燃料消費量は、機体特性、飛行速度、編隊の規模等に複雑に依存する、2) 得られる編隊経路のトポロジーが木ではなく森になってもよいが、森に含まれる木の数が問題を解き始める時点では分からない、3) 有向の経路を扱う、4) 飛行計画等様々な制約を受ける、などの理由から、SMTPで使われてきた様々な解法を直接適用することは不可能である。そこで、本研究ではSMTPの知識も活用しつつ、新たな編隊経路のトポロジーの選択手法の提案を行った。

本研究で提案した手法では、上記の航空機の情報、制約を積極的に活用することにより、膨大な数の経路のトポロジーの中から素早く効率の良いものを選択する。その手法は1) 効率の良い編隊経路のトポロジーの選択、2) 合流・分岐地点の最適化、の2ステップからなる。効率の良い編隊経路のトポロジーの選択は、経路の組に、「編隊飛行を行うことによりどれくらい消費燃料・エネルギーを減らせるか」を表したヒューリスティックを定義し、その値に従ってトポロジーを選択していくものである。本研究では問題の性質に合わせて2種類のヒューリスティックを提案した。

電動無人航空機を対象としたヒューリスティック

一つ目のヒューリスティックは、研究室で運用している電動の無人航空機の運用を対象とし、単一出発地点から同時刻に出発し、到着時刻に制約がない場合に有効なものである。ここでは、到着時刻に制約がない時には、エネルギー消費を最小とする飛行速度が一意に決まり（飛行可能な最低速度で飛行すればよい）、それに伴って各経路に掛かる重みも一意に決まることを利用して、ヒューリスティックを定義した。具体的には、経路に掛かる重みが既知の場合、幾何学的SMTP、特にトリチェリ点の知識を活用することで、消費エネルギーが最小となる分岐地点が求められることを利用し、出発地点と計算された分岐地点の距離をヒューリスティックとした。上記ヒューリスティックを用いて、ある2機が編隊飛行をすると判断された場合、計算された分岐地点を挿入し、経路の置き換えを行う。このプロセスを繰り返すことにより、編隊経路のトポロジーを選択していく。そして、編隊経路のトポロジーの選択が終了された後、挿入された分岐地点の位置、通過時刻の最適化を行う。

モンテ・カルロテストによる検証の結果、上記ヒューリスティックは、到着時刻に制約がない場合には最適な編隊経路のトポロジーを実施した6割以上のケースに対して選択出来ることが分かった。しかしながら、上記手法は到着時刻等の制約を反映出来ないほか、エンジン機のように燃料消費によって機体重量が変化する場合には適用出来ない。

一般の航空機に対応したヒューリスティック

この事実を受けて、様々な制約等を反映出来るよう、ヒューリスティックの改良を行った。改良をされたヒューリスティックでは、ある航空機が他の航空機とa) 合流し、編隊飛行を行った場合、燃料消費が減らすことが可能な合流地点の集合（合流エンベロープ）と、b) 合流し、編隊飛行を行った場合、燃料消費を減らすには編隊飛行を解かなければならない分岐地点の集合（分岐エンベロープ）、の2つの集合・エンベロープが、適当なモデル化を行うことにより解析的に求められることを利用する。今回は、上記2つのエンベロープの重なり部分の距離をヒューリスティックとして用いた。そして、編隊飛行を行うと判断された場合には、上記2種類の領域の重なり部分に、合流、分岐地点をそれぞれ挿入して、経路を置き換える。先の電動無人航空機を対象としたヒューリスティックと同様に、このプロセスを繰り返すことにより、編隊経路のトポロジーを選択していく。そして、選択が終了したのち、今度は合流・分岐地点、両方の最適化を行う。

以上に述べた手法は、モンテ・カルロテストによって検証され、多量のモデル化・近似等を行っているにもかかわらず、非常に高い割合で最適な、あるいは最適に非常に近い編隊経路のトポロジーが選択出来ることが確認された。ただし、同一地点から出発する電動無人航空機に対して上記ヒューリスティックを適用した場合、パフォーマンスは幾分電動無人航空機用に作られたヒューリスティックに劣ることも確認された。また、現行の航空機の運航計画に本手法を適用し、編隊飛行によってどの程度の燃料消費が抑えられるか、あるいは、今後編隊飛行を積極的に活用していくための指針等、有益な情報が得られた。

本研究で提案した手法にはいくつかの特筆すべき特徴がある。まず、最適化が編隊経路のトポロジーが選択されたあとの一度のみ実施されること。これには、一般的に計算コストの高い最適化計算の実施回数を減らして、手法を高速化する狙いがある。このとき、編隊経路のトポロジーを選択する際に挿入された合流・分岐地点が最適化計算の初期解として利用できることは、計算時間を短縮するのに有利に働く。次に、判断のプロセスが全て視覚化可能であること。これは先に述べた人間が航空機を運用することを意識してのことである。3つ目は、最適化計算中に編隊経路のトポロジーが変更されないこと。これもまた、人間が航空機を運用することを前提としているため、運用者が気付かぬ間に編隊経路のトポロジーが変わることによって無用の混乱を引き起こさない為の配慮である。最後に、電動無人機用のヒューリスティック、一般の航空機に対応したヒューリスティック、何れを用いても、編隊経路のトポロジーを選択する過程で、効率の悪い編隊経路のトポロジーが決して選択されない、というはじめに手法に対する要求として掲げたことが満たされている。

以上のように、本研究では、航空機を編隊にて運用するための、編隊経路のトポロジーの選択、合流・分岐地点の最適化手法の提案を行った。その手法は、編隊経路のトポロジーの選択と、最適化のプロセスを分離することにより、高速、かつ視覚的に、効率のよい編隊経路のトポロジーを選択出来るものとなった。