

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 日野 琢磨

修士（工学）日野琢磨提出の論文は、「**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）」と題し、7章からなる。

近年、航空旅客需要の増加に伴い、航空機の温室効果ガスの排出量は増加し続けており、その抑制が急務となっている。また、固定翼型の小型無人航空機（**Unmanned Aerial Vehicle, UAV**）が活躍する機会が増えているが、小型 UAV の航続距離の短さ、搭載可能なペイロードの少なさが制約となり、活躍の場は限られているのが現状である。このような現状を解決する方策として、複数の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て飛行させる方法、すなわち編隊飛行が注目を集めている。それは、編隊飛行を行うことにより、航空機に働く抵抗を減らすことが出来るからである。編隊飛行を行うためには、次の3つの要素が必要である。第一に、編隊飛行を行った場合の航空機間の空気力学的な相互作用について十分理解されていること。第二に、航空機間の相対距離を制御する手法が確立され、編隊を構成する航空機の安全が確保されること。第三に、編隊飛行の利点を有効に活用するための経路生成手法が確立されていること。これら3つの要素のうち、最初の2つについてはこれまでも十分研究が行われてきた。しかしながら、3つめの経路生成手法についてはほとんど研究が行われていない。本論文ではこの現状を踏まえ、編隊飛行の利点を有効に活用するための、有人航空機、小型 UAV の両方の飛行経路に対して適用出来る経路生成手法を確立することを目指している。

第1章は序論であり、本研究にて取り扱う問題、航空機編隊の経路生成 (**formation path planning, FPP**) 問題、を定義すると共に、過去の研究と課題についてまとめた上で、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、編隊飛行の空気力学的な側面について、先行研究で述べられている事項を確認すると共に、独自の解析を行うことで、後の章にて編隊飛行による抵抗の減少をモデル化するのに必要な情報を抽出している。

第3章では、**FPP** 問題の問題空間の大きさ、すなわち **FPP** 問題を解くことによって得られる編隊経路のトポロジー (**formation path topology, FPT**) の数を、数え上げ・組み合わせ論を使って調べている。その結果、**FPT** の数は、初期飛行経路数に対して超指数関数的に爆発することが明らかにされた。ここで得られた情報は、この後に **FPP** 問題を解く方針立てに生かされている。

第4章では、**FPP** 問題を解くための基本戦略を選択している。**FPT** の数が超指数関数的に増加していくことから、**FPP** 問題を総当たり法で解くことは現実的ではなく、何らかの発見的な手法を用いる必要がある。本研究では、**FPP** 問題を、**FPT** の発見的な選択

を行う **FPTS** (**FPT selection**) 問題と、挿入されたウェイポイントの最適化を行う **FPO** (**formation path optimisation**) 問題の 2 つの小問題に分割し、まず **FPTS** 問題を解いた後に、**FPO** 問題を解く戦略を選択した。このことにより、ウェイポイントを最適化する最中に **FPT** の切り替えが起きず、航空機の運用者にとって分かりやすい構成となっている。**FPT** が決定された後の **FPO** 問題は、簡単な非線形計画問題である。従って、この基本戦略の決定を受けて、本研究の目標は **FPTS** 問題を素早く解く手法、すなわち、効率の良い **FPT** を素早く発見的に見つける方法の確立になった。そして、本研究では、飛行経路間に「どれだけ編隊飛行が有効か」を表した類似度を定義し、階層型クラスタ解析を適用することにより、素早く **FPTS** 問題を解くヒューリスティックを導いた。

第 5 章では、まず最も基本的なケースである、全ての航空機が同時に同一地点から出発し、目的地の到着予定時刻に制約が無い **FPP** 問題に対して有効なヒューリスティックを提案、検証している。検証の結果、重み付きのフェルマー点を用いたヒューリスティック、並びに、各航空機が編隊飛行を出来る領域を表したエンベロープを用いたヒューリスティックが、素早く、効率の良い **FPT** を選択出来ることが確認された。また、より複雑な **FPP** 問題を解く際、重み付きフェルマー点では必要な情報を表しきれないことが簡単な検討から明らかにされている。

第 6 章では、第 5 章で提案したエンベロープを用いたヒューリスティックを、より複雑な **FPP** 問題に適用出来るよう改良を行っている。具体的には、出発地点の数が複数個ある場合、到着予定時刻に制約がある場合、あるいは燃料消費による機体重量の変化がある場合に、対応出来るように改良を行った。その改良策は、エンベロープの数をこれまでの一つから、合流可能な地点、分岐しなければならない地点をそれぞれ表したエンベロープの 2 つに増やすことであった。その結果、数値検証により、提案した 2 つのエンベロープを用いるヒューリスティック (**dual envelope heuristic**) は、第 5 章同様、効率のよい **FPT** を素早く選択出来ることが確認された。また、本章の最後では上記 **dual envelope heuristic** を実際の旅客機の運航計画に適用し、編隊飛行の効果を確認するとともに、今後編隊飛行をより有効に活用するための指針を打ち出している。

第 7 章は結論であり、提案した **FPTS** 問題の解法について得られた知見をまとめ、今後の課題を述べている。

以上、要するに、本論文は、航空機の編隊飛行を有効活用するための、様々な種類の問題に適用可能な経路生成手法の提案を行っている。また実際の旅客機の運航計画に適用した結果、ならびに今後編隊飛行を航空機の運航に取り入れる際の指針の提案を行っており、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。