

論文の内容の要旨

1 申請者

防衛大学校 ルー フィー ソン

2 論文題目

航空機の安定微係数の推定値を用いた風の推算

3 論文の内容の要旨（博士:2,000 字程度）

航空機の線形化運動モデルの微係数は飛行データから推定されるが、大気中には通常、風が存在し、風は推定結果に大きな影響を与える。風は基本的に対地速度ベクトルと対気速度ベクトルが計測できれば、その差として求めることができる。対地速度ベクトルは慣性計測装置（Inertial Measurement Unit, IMU）や全地球測位システム（Global Positioning System, GPS）をはじめとする全地球航法衛星システム（Global Navigation Satellite System, GNSS）を用いて知ることができ、比較的安価な計測装置も利用できる。一方、対気速度ベクトルは多孔プローブを用いたエアデータ・システムで計測・算出されるが、風洞試験による較正が必要であり簡易な無人機に搭載するには高価なシステムとなる。そのため、安価なピトー静圧管を用いて対気速度を計測し、その計測値を IMU や GPS の計測データとともに利用して風や対気速度ベクトル（速度の大きさ、迎角、横滑り角）を推定したり、対気速度の修正（バイアスの推定）を行ったりする研究が多くなされている。それらの研究は空気力学モデルのパラメータ（揚力係数、抗力係数、揚力傾斜とその他の空力微係数）が既知とするか対気速度の計測ができるとしている。著者の知る限りでは運動モデルのパラメータと対気速度をともに未知として風を推定する問題を扱った研究はこれまでない。本論文では、対気速度の情報や既知の運動モデルを用いず IMU と GPS の計測データ（対地速度、姿勢角速度、姿勢角）のみを用いて風を推定する方法を提案する。

提案手法では、風速が飛行速度に比べて十分小さく一定であると仮定した場合に、線形化運動モデルの微係数の一部が風に関する線形式で表されることに注目する。そして微係数を推定することにより、この線形式から風を算出する。風が微係数に現れる理由は以下の通りである。まず、航空機に作用する空気力は対気速度によって決まり、対気速度は対地速度と風の差によって決まる。したがって、運動方程式の空気力に関する項の速度を対地速度と風の差に置き換えると風を考慮した運動方程式が得られる。ただし、慣性座標で定義された風は機体座標に変換する必要があるため、運動方程式に現れる風はオイラー角の関数になる。こうして、風がオイラー角に関する微係数に含まれるのである。航空機には空気力以外に重力、推力、慣性力が作用する。重力と慣性力は風と無関係であるが、推力は対気速度（したがって風）によって変化

する。しかし、そのメカニズムは複雑であり飛行条件や推進装置によって異なる。このことと風速が比較的小さいという仮定から本論文では推力に対する風の影響を考慮しない。

本論文で用いている推定法は最小 2 乗法および拡張カルマンフィルタである。航空機の対地速度は GPS の受信データを用いて求めることができる。また加速度、姿勢角や姿勢角速度は IMU の出力として得られる。これらの観測データと舵角入力を用いて前述の推定法により微係数、風及びトリム点を推定する。提案する方法の特徴は、風が一定であるという仮定の下で、風が状態変数に対する加法的な外乱である点に注目し、2 段階で推定を行うことである。すなわち、まず微係数とトリム点に関するパラメータを推定し、その結果から風とトリム点を算出する。このとき、風外乱にも微係数がかかるので未知数同士のかけ算が生じるため、一般的には風と微係数を区別して推定することはできない。しかし、オイラー角に関する微係数のみに風が現れることからこれが可能となる。

提案手法の有効性を調べるため、まず航空機 (Boeing 747) の線形モデルに適用したシミュレーションにより有効性を検討した。その結果、縦運動モデルでは微係数とトリム点を推定することによって風を求めることができ、横・方向運動モデルではトリム点の推定の必要がないため微係数のみの推定結果に基づいて風の推定が可能であることが確かめられた。次に NASA が提供する 5.5%スケールの双発ジェット輸送機の非線形運動モデル (Generic Transport Model, GTM) に適用した。GTM のソフトウェアではユーザがトリム迎角、飛行経路角、一定風を与えるとトリム状態が計算され、そのトリム点における線形モデルの微係数が算出される。そして、ユーザが与えた入力に対して線形および非線形モデルを用いた航空機の運動が計算される。本研究では非線形モデルのシミュレーション結果にノイズを加えた信号を飛行データとみなして縦および横・方向の運動に関する微係数とトリム点を推定し、その推定値から風を算出した。その結果、微係数に推定誤差があっても、水平面内の風の推定誤差は比較的小さいことが示された。しかし、鉛直方向の風の推定誤差は水平方向の誤差に比べて大きくなることも確認された。そして、そのような風の推定誤差が生じる理由を解析と数値例で示した。最後に、微小変動を含むステップ状に変化する風に対しても推定を行い、定常風と同様に推定が可能であることをシミュレーションで確かめた。

今後の課題として、鉛直方向の風の推定精度の改善や連続的に変化する風の推定を行う必要がある。また、試験入力ではない通常の操縦における入力や実飛行データを用いた推定についても検討する必要がある。

4 キーワード (5 個程度)

「Aircraft flight dynamics」, 「Parameter estimation」, 「Wind estimation」, 「Stability derivative」