

風を利用した低速観測飛行のための小型固定翼無人航空機の開発

Development of a small fixed-wing unmanned aircraft for low-speed observation flight

知能機械システム工学コース

機械・航空システム制御研究室 1225047 福井 太志

1. はじめに

近年、上空からの観測の手段として小型無人航空機(UAV: Unmanned aerial vehicle)の需要が高まっている。小型無人航空機による観測は、詳細な情報を収集するのが目的であり、低速飛行およびホバリングが行える回転翼型 UAV が主流となっているが、回転翼型 UAV は飛行時間および航続距離が短く、1回の飛行で観測を行える時間および範囲に限られる。一方、固定翼型 UAV は飛行時間および航続距離が長く、長時間および広範囲の観測を行えるが、飛行に必要な速度が回転翼型よりも速く、詳細な情報の収集を行うには同じ地点の上空を複数回通過するなどの必要がある。固定翼型でも飛行中に低速飛行あるいはホバリングを可能にすることで、詳細な情報を広範囲にわたって収集できると考えた。

通常の固定翼機は前方に進むことで相対風より揚力を発生させて飛行しているため、速度が低くなると揚力が減少し高度の維持ができなくなる。ティルトウイング機等の低速飛行およびホバリングが可能な固定翼機は、低速飛行時に低下した揚力を補うために上向きの推力を出す等して高度を維持する。鉛直上向きの推力を出すためには、ティルトウイング、ティルトローターおよびそれらを駆動するための装置や機構を用意する必要があり、構造が複雑化し重量の増加につながる。低速飛行およびホバリング時に飛行を維持するための推力を出し続ける必要があるため、低速飛行時にエネルギーを水平飛行時よりも多く消費し、航続時間が短くなる等の問題が存在する。

これらの問題を解消する方法として、自然現象である風を利用して飛行に必要な速度を補うことを考えた。これにより特殊な装置を搭載する必要がなく、従来の固定翼機の形態のまま低速飛行が可能となる。

本研究では、風を利用した低速観測飛行を行う固定翼無人航空機の開発を目的とする。飛行しながら風速・風向を推定し、機体を旋回させて機首を風向に向けることで低速飛行を行う制御プログラムを作成し、風を利用した低速飛行シミュレーションを行うことで風を利用した低速飛行が可能であることを確認する。

2. 風利用低速飛行法

揚力を L 、揚力係数を C_L 、空気密度を ρ 、対気速度を V_{as} 、主翼面積を S とすると揚力の式は次のように表される。

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{as}^2 S C_L \quad (1)$$

対地速度を V_{gs} 、風速 V_w とすると対地速度のベクトルは次のように表される。

$$\vec{V}_{gs} = \vec{V}_{as} + \vec{V}_w \quad (2)$$

風向と機首方位を一致させて向かい風にした場合、対地速度は

$$V_{gs} = V_{as} - V_w \quad (3)$$

となり、対気速度が向かい風の速度と等しくなるように推力を制御することで対地速度を下げる事が可能となる。

3. 風速風向推定法

航空機は通常、風の影響を受けて機首が向いている方向と実際に進んでいる方向が異なり、対地速度ベクトルと対気速度ベクトルに差が存在する。そのベクトル差を利用し、風向および風速を推定する。

地上航跡を ψ_{gt} 、機首方位を ψ とすると、横滑り角および迎角が0に近い場合、北方向の対気速度成分 V_{asN} 、対地速度成分 V_{gsN} 、東方向の対気速度成分 V_{asE} 、対地速度成分 V_{gsE} は次のように表される。このとき方位は北を 0° として、西を -90° 、東を 90° 、南を 180° とする。

$$V_{asN} = V_{as} \cos \psi \quad (4)$$

$$V_{asE} = V_{as} \sin \psi \quad (5)$$

$$V_{gsN} = V_{gs} \cos \psi_{gt} \quad (6)$$

$$V_{gsE} = V_{gs} \sin \psi_{gt} \quad (7)$$

上昇気流を考慮しない場合、風速 V_w および風向 ψ_w は

$$V_w = \sqrt{(V_{asN} - V_{gsN})^2 + (V_{asE} - V_{gsE})^2} \quad (8)$$

$$\psi_w = \tan^{-1} \frac{V_{asE} - V_{gsE}}{V_{asN} - V_{gsN}} \quad (9)$$

となる。 ψ_w は \tan^{-1} で求めているため、計算の解が $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲になり、南方から吹く風の風向を正しく推定できない。これを $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲にして全方向の風向の推定を可能にする必要がある。

$-180^\circ \sim 180^\circ$ への範囲の拡大には風の世界ベクトルを利用する。風の北方向の速度ベクトルを V_{wN} 、東方向を V_{wE} とすると、

$$V_{wN} = V_{asN} - V_{gsN} \quad (10)$$

$$V_{wE} = V_{asE} - V_{gsE} \quad (11)$$

となる。

$V_{wN} < 0$ かつ $\psi_w < 0$ の場合、風は南東から吹いていると判断し風向は

$$\psi_w = \psi_w + 180 \quad (12)$$

とする。 $V_{wN} < 0$ かつ $\psi_w > 0$ の場合、風は南西から吹いていると判断し風向は

$$\psi_w = \psi_w - 180 \quad (13)$$

とする。

次に 90° および 90° の風を推定する必要がある。 \tan^{-1} で求めているので 90° および -90° となる解が存在しない。そのためエラーを回避するために風ベクトルから 90° および -90° の風を推定する。 $V_{wN} < 0.3$ かつ $V_{wE} > 0$ の場合 $\psi_w = 90$ とし、 $V_{wN} < 0.3$ かつ $V_{wE} < 0$ の場合 $\psi_w = -90$ とする。

最後に 180° または -180° への風向の固定化を行う。南方向の機首方位、地上航跡を計測するときに方位が -180° から 180° への数値上大きな変化が生じることがある。 -180° から 180° への変化が発生した場合、方位偏差が大きくなり、制御ができなくなる場合があるため、 180° または -180° に近い方向から風が吹いている場合、 180° または -180° に風向を固定することで制御を可能にする。 $|V_{wE}| < V_w \times 0.09$ かつ $V_{wN} < 0$ の場合、 180° または -180° に近い風向から風が吹いていると判断する。現在の機首方位から方位の正負を決定

し 180° または -180° へ固定する. $\psi < 0$ の場合風向を $\psi_w = -180$ とし, それ以外の場合, $\psi_w = 180$ とする.

以上の方法で推定可能な方位を $-180^\circ \sim 180^\circ$ に拡大する.

4. 風利用低速飛行制御

飛行制御には制御ソフト「ArduPlane」を使用する.

ArduPlane はロール角およびピッチ角を図 1, 図 2 に示すブロック線図にしたがってフィードバック制御を行い, 指定したポイントへ自動で機体を誘導し, そのポイントで周回飛行する等の自動飛行を行う制御ソフトである. 本研究では飛行の指示部分であるフライトモード部で, 風向・風速を推定, 機首を風向に向けることで低速飛行を行うプログラムを作成した. 機首を風向に向ける制御プログラムのブロック線図は図 3 のようになり, 指示機首方位を風向として, 機首方位を P 制御でロール角に変換, 変換したロール角を指示ロール角として ArduPlane のロール角制御系に入力し機体姿勢を制御することで機首方位を制御する. このとき指示ロール角が大きくなりすぎないように 30° 以下に制限する.

同時に高度についても制御を行う. 高度制御系のブロック線図は図 4 のように高度を P 制御でピッチ角に変換, 変換したピッチ角を ArduPlane のピッチ制御系に入力し機体姿勢を制御することで高度を制御する. このとき指示ピッチ角が大きくなりすぎないように 20° 以下に制限する.

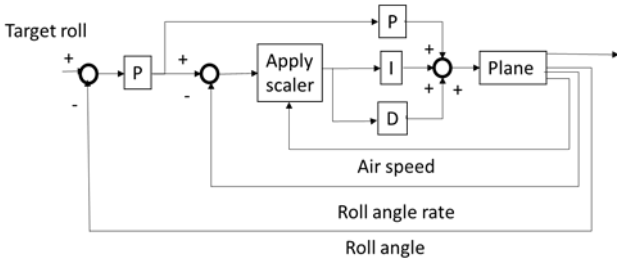


Fig. 1 ArduPlane roll controller

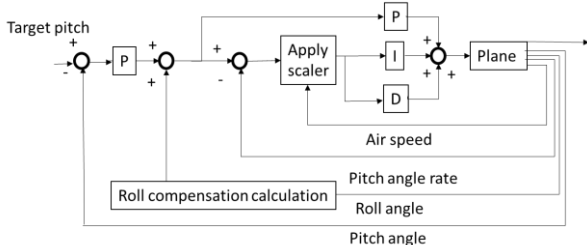


Fig. 2 ArduPlane pitch controller

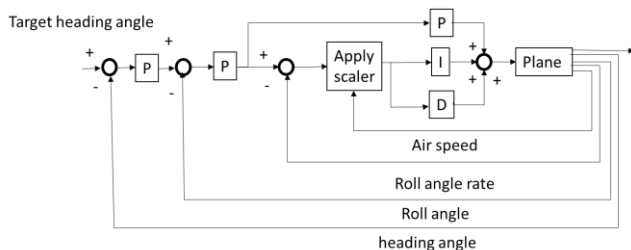


Fig. 3 Heading controller

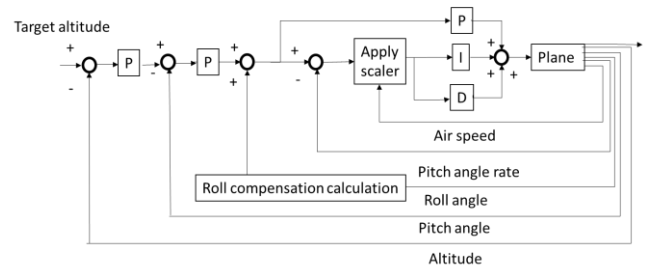


Fig. 4 Altitude controller

5. 風を利用した低速飛行のシミュレーション

シミュレーションには STIL シミュレーターを使用する. 風向・風速を推定し, 機首を風向に向ける制御プログラムを用いて, 風を利用した低速飛行のシミュレーションを行った. このとき風向は 160° , 風速は 10m/s の定常風, 風が吹いている高度は 60m とし, 目標高度は 60m とした.

シミュレーションの結果は図 5 のようになった. $60\text{s} \sim 70\text{s}$ の間に存在する縦の線は風利用低速飛行を開始した時刻 66s であり, 方位のグラフに存在する横の線は方位 160° を示す.

機首と高度のグラフを見ると機首方位と高度は目標方位である推定した風向と目標高度に追従できている. しかし, ロール角およびピッチ角の最大値はロール角が 41.24° , ピッチ角は 25.54° であり制限値を超えているため, ロール角制御系およびピッチ角制御系の PID 値の調整が必要である.

方位のグラフを見ると推定した風向は 80s 以降から 160° を指しており, 80s 以降では風向を正しく推定できていると言える. しかし 67s 付近で振動が発生して誤差がでている. これは風向・風速推定の式に横滑りおよび機体の姿勢を考慮していないためだと考えられる. 機体の姿勢と風向を見ると機体の姿勢が変化した時に大きく誤差がでている. 80s 以降で風向が正しく推定できたのは, 風向と機首方位の差が少なくなり, 横滑りが小さくなったため正しく推定できたと考えられる.

次に速度のグラフを見ると, 90s 以降から風速を 10m/s と推定しており, 90s 以前では 10m/s 以下と推定している. 速度と高度のグラフを見ると高度が 60m に近づくにつれて推定した風速が 10m/s に近づいている. 高度が 60m になった 100s 以降では, 風速を 10m/s と推定しており, 風が吹いている高度は 60m なので正しく推定できていると言える. なお風速が高度 60m 以外の高度で 0m/s ではないのはシミュレーター上で高度 60m での風速の影響が他の高度で考慮されているためである. 67s 付近で風速に振動が発生している. これは風向推定と同様に姿勢角の変化が原因だと考えられる.

方位のグラフと速度のグラフを見ると機首方位が風向に近づくにつれて対地速度が減少しており, 最終的には 0m/s になっている. 一方, 対気速度は 70s 以降では 10m/s に近い値を取っており, 最終的に 10m/s に収束している. 風速は 10m/s であり, このことから対気速度を向かい風の速度と一致させて対地速度を下げ, 低速飛行を行っていることがわかる.

以上から作成したプログラムを使用し, 風速, 風向を推定, 機首方向と風向を一致, 対気速度と向かい風の速度を一致させて対地速度を下げ, 風を利用した低速飛行が可能であることを確認できた.

現在の問題点として, 姿勢角が変化した場合風向と風速に誤差が生じる問題, ロール角およびピッチ角の制限を超える問題が存在する. そのため姿勢角の変化を考慮した風速風向推定, ロール角およびピッチ角制御系の PID 値の調整が必要だと考えられる.

6. まとめ

本研究では風向・風速を推定し風利用低速飛行を行うプログラムを作成し、P制御でロール角を指定、機首を風向に向けて風利用低速飛行が可能であることをシミュレーション上で確認した。しかし、姿勢角が変化した場合風速風向推定結果に誤差が生じるため、より正確に風速風向を推定するための風速風向推定法の改善、ロール角およびピッチ角の制限を超えないために制御系のPID値の調整が必要であったとわかった。

シミュレーション上では風速を一定にしているが、実際は風速と風向が常に変動している。本研究の方法では風速が変化すると対地速度が変化するため、機体を旋回させて機首方位を制御しているため、機首方位と風向を一致させるのに時間がかかる、微細な風向の変化に対応できないといった問題が存在する。これらの問題を解決するため、風速にあわせて揚力を一定にして対地速度を一定にする方法、機首方位の制御系を改善して風向の変化に対応する方法を考える必要がある。また風が南方向から吹いている場合、方位制御を可能にするために 180° または -180° への固定化を行っているが、南方向の風で風向が 180° ではない場合、推定する風向の誤差が発生するため、南方向の方位制御を改善が必要である。今後は、姿勢角の変化を考慮した風速風向推定法の考案、風速変化時に揚力を一定にする方法の考案、南方向の方位制御の改善、実際の機体での風利用低速飛行を行っていく。

参考文献

- (1) ArduPilot Documentation (最終閲覧日 2020-1-17)
<https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>
- (2) Plane Architecture Overview (最終閲覧日 2020-1-17)
<https://ardupilot.org/dev/docs/plane-architecture.html>
- (3) SITL Simulator (Software in the Loop) (最終閲覧日 2020-1-17)
<https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html>
- (4) SITL Advanced Testing (最終閲覧日 2020-1-18)
<https://ardupilot.org/dev/docs/using-sitl-for-ardupilot-testing.html#>
- (5) Roll, Pitch and Yaw Controller Tuning (最終閲覧日 2020-1-17)
<https://ardupilot.org/plane/docs/roll-pitch-controller-tuning.html>
- (6) 加藤寛一郎, “航空機力学入門” 東京大学出版会, (1982)

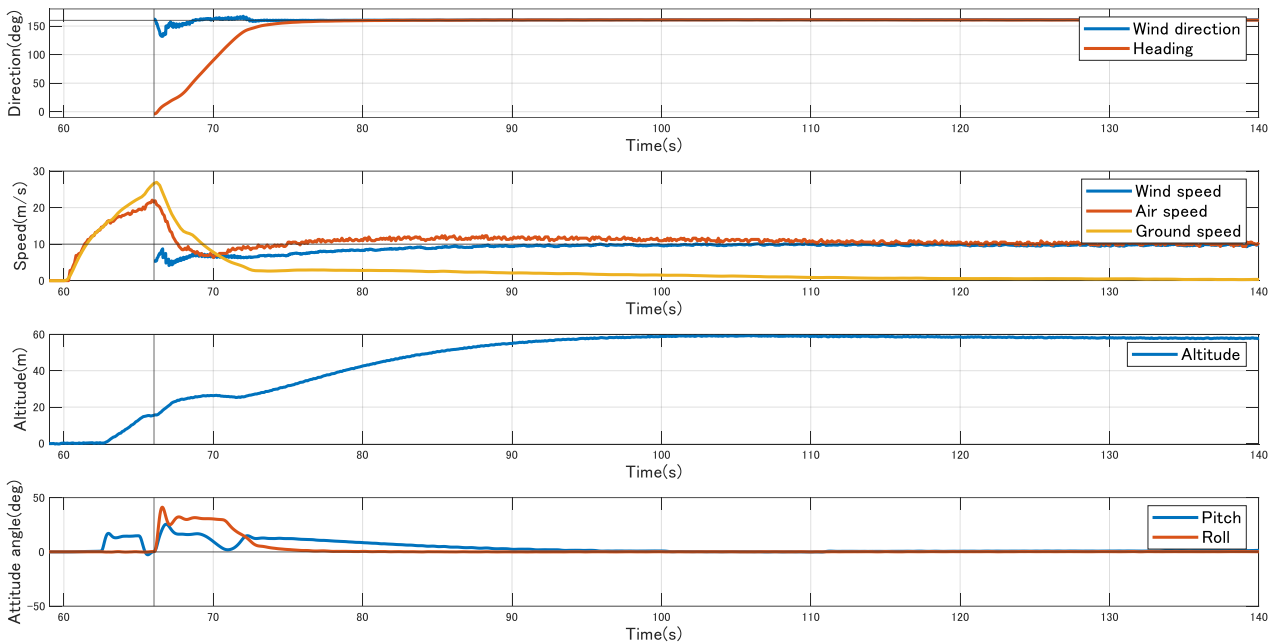


Fig. 5 Simulation results of low speed flight using headwind