

5. AIを用いた不安定進入の要因分析

航空交通管理領域 ※森 亮太

1 はじめに

航空機は安全性を最優先として運航されているが、依然として世界では航空機による事故が報告されている。航空機の事故のおよそ半分は進入・着陸時に起きており[1]、着陸時の事故の要因として不安定進入(Unstabilized/Unstable approach)が報告されている。そのため、国際民間航空機関(ICAO)においても安定進入(Stabilized approach)を遵守するよう求めており[2]、運航者はパイロットが安定進入となるよう、トレーニングを行うことが必要とされている。安定進入とは、VMCの場合で高度500ft、IMCの場合で高度1000ftまでに、航空機が安定することを求める概念である。安定であることは具体的には、所望のパスから大きく逸脱していないこと、姿勢角や速度の変化が最小限であること、推力の変動が最小限かつアイドルでないこと、などとされている。そして、安定進入の条件を満たさない場合には、進入復行・着陸復行(ゴーアラウンド)を行うべきとされている。しかしながら、実際には不安定進入にも関わらず、進入を継続しているケースも存在すると報告されている[3]。

不安定進入の要因としては、飛行環境(視程、風、地形)、パイロット(状況認識力の欠如、乗員の疲労、不適切な降下スケジュール)、その他(他航空機の干渉、飛行の遅延、直前の滑走路変更、管制の指示)、など多くの要因が複合的に作用した結果と言われている。しかし、一番重要なのは実際に操作を行うパイロットであると考えられる。飛行環境やその他の要因は、パイロットがどのように対処しても対処不可能な場合もあれば、パイロットが適切に対処することで不安定進入を回避できる場合もある。そのため、パイロットを適切に訓練することで、不安定進入を減らすことができると考えられる。

しかし、問題はどのように不安定進入の問題点を把握し、どのパイロットにどのような訓練を行うべきかを判断することである。不安定進

入は先に示したように、いくつかの指標をもとに判断されるため、指標ごとに基準を設けることで不安定進入かどうかを分類することは比較的容易である。そして、分類されたフライトの原因を1つ1つ調べることも可能であり、現在航空会社では不安定進入を減らすためにこのようなアプローチを行ってきた。

しかしながら、このアプローチには以下のような問題点が存在する。1つ目に、不安定進入と判断される件数は非常に限られており、それが不安定進入の起きる要因すべてを同定できるわけではないことがある。それぞれの不安定進入に対して、もっともらしい原因を見つけることは可能であるが、それは不安定進入が起こった根本的な原因であるとは限らない。逆に、不安定進入を定義する基準を広くとると、分析データが膨大となり、すべてのデータの分析を行うことが現実的でなくなってしまう。

2つ目に、不安定進入ではなかったデータの有効活用がなされていないことである。通常分析だと、どこかで不安定進入の線引きをしないとイケないが、不安定進入と分類されなかったデータからの知見は一切使用されないことになる。限られたデータによる分析では、統計的な判断が難しいといった問題もある。

そこで、本研究では、不安定進入と判断されたデータも判断されていないデータもすべて用い、各フライトが他のフライトとどの程度異なるか、といった指標をもとに、不安定進入の要因分析を行う手法を提案する。当該フライトが他のフライトとどの程度異なるかということ算出する手法として、近年注目されているAI、具体的には回帰型NN(NN)というモデルを使用する。そして、他と異なると判断されたフライトがどのような条件で発生しているか、ということ統計的に分析することにより、要因分析を行うこととする。

本稿においては、まず使用データとデータの分析手法を説明し、その際にモデル化に用いる

帰型 NN について説明を行う。その後、得られた結果の説明を行う。

2 使用データと分析内容

2.1 不安定進入の定義

不安定進入は、1章で示すようにいくつかの基準があるが、統一的な定義といったものは存在しない。そこで、今回は[4]を参考として、滑走路対地高度 500ft 以下において、表 1 に示す基準を一瞬でも満たした場合に不安定進入と分類することとした。これは、必ずしも着陸がいわゆる不安定進入であったことと同義ではないが、一つの基準としては使用可能だと考えられる。

表 1 不安定進入の基準

パラメータ	不安定とする範囲
CAS	V_{ref} 以下 or $V_{ref}+20$ kt 以上
降下率	1000ft/min 以上
ロール角	7 度以上
LOC deviation	1/4 dot 以上
G/S deviation	1 dot 以上
推力量	アイドルでないこと

2.2 使用データ

今回、不安定進入の分析のため、航空会社から QAR (Quick access recorder)データの提供を得て、モデリングおよび分析を実施した。同一空港同一滑走路に着陸する ILS 進入 128 フライトを分析対象とした。フライトを区別するため、0-127 の ID をつけた。QAR フライトデータには、航空機の様々なパラメータが 1 秒おきに記録されている。そのうち、今回は以下のパラメータを分析に使用した。

- ・時刻
- ・緯度経度
- ・気圧高度(QNH)
- ・ピッチ角
- ・ロール角
- ・G/S deviation
- ・LOC deviation
- ・昇降率
- ・トラック角
- ・風速風向
- ・CAS

- ・目標 CAS
- ・推力量

V_{ref} は直接 QAR データには含まれていないものの、着陸時の目標 CAS+5kt を便宜的に V_{ref} として処理して計算してある。

2.3 不安定進入と判断されたデータ

128 フライトのデータを、表 1 に基づいて不安定進入の分類を行ったところ、12 フライトが不安定だと判断された。いずれも、CAS が設定された範囲を超えたことで不安定と判断された。これら 12 フライトのうち、ゴーアラウンドを行った航空機は 1 フライトのみであった。不安定と判断されたフライトのうち、いくつかを実際に分析してみる。

図 1 は ID65 のフライトである。速度が大きく振れており、対地 500ft を切ったあたりで、CAS が $V_{ref} +20$ kt を超えており、それが不安定と判断された根拠となっている。しかし、向かい風成分も CAS と一緒に大きく動いており、風が非常に強い日であったと想定される。風が大きく変化すると、CAS も大きく変化しやすく、当該フライトで CAS が大きく変動したのは、風が理由である可能性が高く、パイロットが原因であった可能性は低いのではないかと想定される。

一方、図 2 は ID100 のフライトである。高度 350 ft 近辺で CAS が V_{ref} を切っており、これが不安定と判断された原因である。しかし、ID65 のケースと異なり、風の変化は小さく、速度が低くなった直接的な原因が判明しない。速度も周期的な変化が観察され、何か別の要因がある可能性がある。

まとめると、前者は主に風が原因と考えられるため、パイロットの操縦自体に問題があった可能性は低いと考えられる一方、後者は原因がはっきりとせず、パイロットや他の原因があり、それは回避できる可能性がある。そういった意味で、特に後者のフライトについて、考えられる要因が判明すれば、不安定進入を防ぐ効果があるのではないかと考えられる。そのような目的で本研究を実施する。

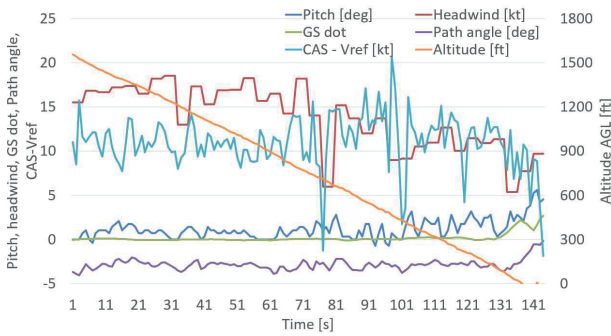


図1 フライトデータ(ID 65)

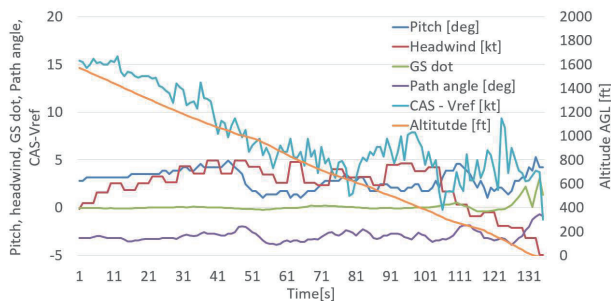


図2 フライトデータ (ID 100)

3 不安定指標のモデル化

3.1 不安定指標の定義

先に他と異なるフライトを抽出することで、不安定進入の要因分析を行うと述べたが、それにあたりフライトの不安定度を示す不安定指標の定義を行う。ここでは、以下の Ω を不安定指標として定義する。

$$\Omega = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} |\psi_{i+1} - \psi_i|}{t_N - t_0} \quad (1)$$

ψ はトラック角を示しており、この式であれば、横方向の運動の不安定指標となる。トラック角が一定の場合はゼロとなり、トラック角の動きが大きければ、逸脱量が増加することとなり、指標も大きくなる。つまり、不安定指標の値が大きければ、不安定度も高いと判断できる。ここでは $N=16$ として 16 秒間のトラック角の変化量をもとに不安定度を判定する。そして、1 フライトに対して、4 秒おきに不安定指標を計算することで、1 フライトに対して複数の不安定指標を持つこととなる。なお、 ψ を昇降率に置き換えることで、同様の定義で縦方向の不安定指標の計算が可能である。

2 章の分析にあたっては、不安定と判断されたフライトは速度超過、速度過小で、縦方向運動によるもののみであったが、ここではあえて横方向の不安定指標をもとに不安定進入の要因分析を行う。

3.2 不安定指標の入力とモデル化

不安定指標をモデル化するにあたり、一般に風などの飛行環境と不安定指標はある程度相関があるという前提知識がある。風が強ければ不安定度が増すのは、言ってみれば当たり前であり、本研究で期待されているのはそれ以外の要因をさぐることである。そこで、これら自明な要因については事前に考慮に入れたうえで、各飛行環境における不安定指標を推定し、それからのずれを見ることにより、飛行環境以外の要因により他と異なるかどうかを判別することができるようにと考えられる。

今回は、不安定指標のモデル化にあたり、回帰型 NN を使用した。通常の NN は、入力から出力に

データ一方向に流れ、同一入力に対しては常に同じ出力となる。その一方、回帰型 NN は、モデル内に過去の入力情報を記憶することができるため、例えば風の過去の変動量を記憶し、現時点の風情報だけでなく過去の風情報を加味した上で、妥当だと考えられる不安定指標を推定することができるようにと考えられる。回帰型 NN としては、GRU と呼ばれるものを使用し、図 3 に示したように通常の FFNN(Feedforward NN/順伝搬型 NN)を組み合わせ使用することとする。ネットワークの入力としては、横風成分、向かい風成分、LOC deviation、初期高度、初期トラック角、初期ロール角を選定し、実際のデータから学習を行い、各々の入力に対して適切だと考えられる不安定指標が出力されることとなる。モデルの詳細については、文献[4]を参照されたい。

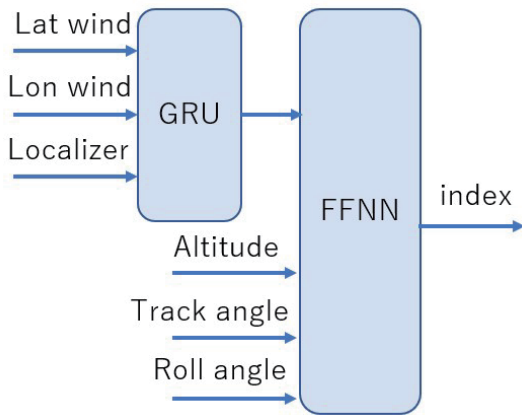


図3 使用したネットワーク構造

4 結果

4.1 モデル化結果（横方向）

図4に不安定指標のモデル化の結果を示す。横軸がNNにより推定された不安定指標であり、縦軸が実際の不安定指標を示している。不安定指標を正確に推定できていれば(推定指標=実際の指標)、赤線上に示されることになる。各データは先に示したように、16秒ごとのデータを示しており、128フライトから4956の不安定指標が計算され、プロットされている。

図を見ると、データは概ね赤線の周りに配置されており、不安定指標が大きくなるほど、そのばらつきは大きくなる傾向がみられることがわかる。推定された不安定指標は、あくまで飛行環境や初期値をもとにした推定値であるため、この推定値と実際の値が大きく異なる場合、当該データは他と異なると判断できると考えられる。

実際、図によると、赤線からはるか上方に位置しているプロットが散見される。これらは、不安定指標推定値と比較して実際の不安定指標が高い、つまり、推定よりも不安定であると判断されたデータである。逆に、赤線よりはるか下方、つまり、推定よりもはるかに安定であると判断されたデータは皆無であることも興味深い。

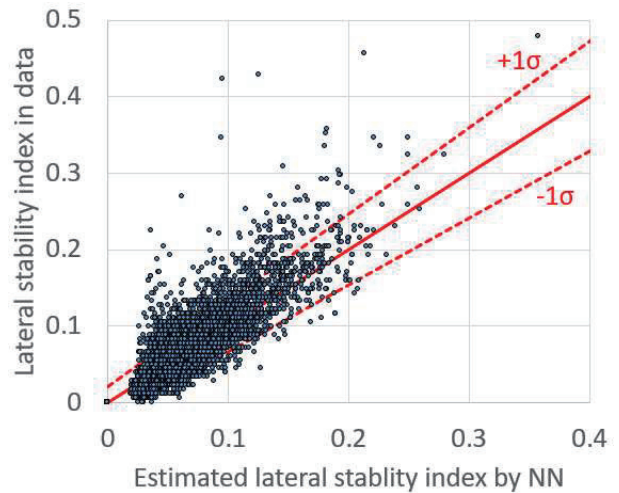


図4 不安定指標推定値と実際の不安定指標の関係

図4のプロットは、1フライトに対して複数存在し、また、図4に示されるように、不安定指標推定値により観測される標準偏差が異なるため、実際の不安定指標から推定不安定指標を差し引き、標準偏差で割った値を、乖離度として定義する。そうすることで、そのときに不安定指標の値に関係なく、他のフライトとどの程度異なるかということを数値化できる。そして、フライトごとに最大の乖離度のデータをそのフライトの代表値として使用することで、フライトごとに乖離度を計算した。その結果を図5に示す。

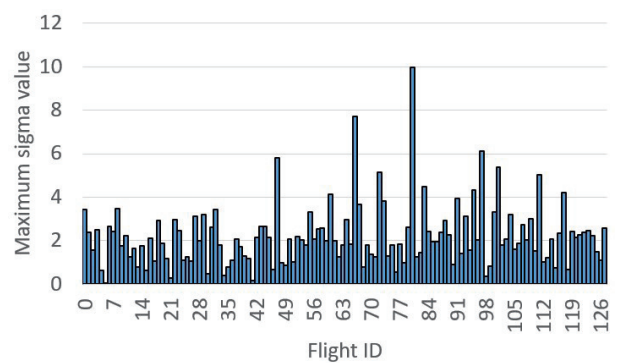


図5 各フライトの乖離度

フライトごとに乖離度が計算され、ID80のフライトが最大乖離度 9.99 を示していることがわかる。こうすることで、すべてのフライトにおいて乖離度が計算され、データの統計的な処理が可能となる。

4.2 要因分析(横方向)

図5をもとに、乖離度の高いフライトの要因分析を行った。いずれのフライトも表1のうち横方向の不安定進入の基準には当てはまらないため、従来であれば分析さえされなかったフライトである。

まず最大の乖離度を示したID80のフライトを図6に示す。青色がロール角であり、最大10度弱まで観測されていることがわかる。この観測は500ft AGL以上で起こったため、不安定進入の定義には引っかからなかった。それに遅れて、紫色で示されるトラック角も、ロール角の動きに合わせて動いたことがわかる。緑色はローカライザー変位を示しているが、ロール角に先行して動いていることがわかる。逆に言えば、ロール角やトラック角が動く前に、変位が観測されており、これはローカライザーが何らかの要因によりとんだものではないかと想定される。つまり、ローカライザーが飛んだ(つまり、実際には変位がないにもかかわらず、変位があったと観測された)ことにより、変位を修正するために大きなロール角が入力され、それにより実際に変位が起こったものと考えられる。ローカライザーの飛びは一瞬で解消されたため、その後は実際の変位を元に戻すために、制御が加わり、元の経路に戻ったものと想定される。

なお、乖離度が高い他のデータも調べたところ、少なくとも乖離度が高い方が5つのデータについては、ローカライザーの飛びが原因であると結論付けられた。

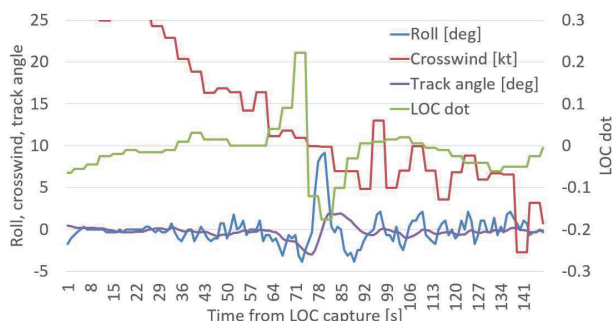


図6 フライトデータ (ID80)

逆に、ローカライザーが飛んでいたにもかかわらず、実際に変位が観測されなかったフライト(ID82)も存在した。このフライトの乖離度は

1.45で、かなり小さい値であった。そのフライトデータを図7に示す。フライトデータを見ると、130秒頃に緑色で示されるローカライザー変位が大きく動いていることがわかるが、それに続いてロール角やトラック角の変化は見られない。本フライトにおいては、110秒頃にオートパイロットが切られており、ローカライザーが飛んだ時にはパイロットのマニュアル操縦が行われており、パイロットは機械的にローカライザー変位を追うのではなく、ローカライザーの飛びが原因だと考え、何もしなかったことで、実際には経路逸脱が起らなかったであろうと推測される。

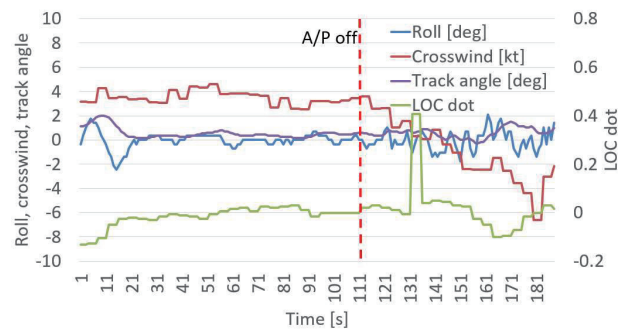


図7 フライトデータ (ID82)

本分析から判断すると、当該空港・滑走路においては、ローカライザーの飛びがそれなりの頻度で発生しており、オートパイロットで飛行している場合は、多かれ少なかれ経路逸脱が発生していることがわかった。このような逸脱は危険因子の一つであり、低視程、強風など他の要因が重なると事故の危険性が高まると考えられる。マニュアル操舵であれば、このような事象は発生しないことから、当該空港・滑走路においては早めのマニュアル操舵の切り替えも対策としては考えられる。

4.3 要因分析(縦方向)

縦方向についても、横方向と同様の分析を行った。相当する入力については、適宜変更したうえでモデル化を行っている。縦方向の乖離度を図8に示す。フライトごとの乖離度は横方向ほどは大きくない様子が見て取れる。最大の乖離度となったフライトは、図2に示すID100のフライトであった。乖離度の高いものについ

て個別に分析を行ってみたが、横方向の場合とは異なり、乖離度の大きいものに特定の要因と思われるものは観察されなかった。そこで、乖離度の大きいものと他の要因について、95%値で関連があるかどうかということ調べてみた。具体的には、以下の項目について、乖離度と有意に関連があるかどうかを調べた。

- LOC capture 位置
- Landing Flap 展開高度
- Vref
- A/T を着陸まで使用したかどうか
- A/P off の高度
- Full landing flap を使用したかどうか
- 1000 ft における Target に対する速度
- 500 ft における Target に対する速度
- 視程
- GS capture 高度
- 着陸前 30NM 地点におけるエネルギー
- 着陸前 50NM 地点におけるエネルギー

その結果、関連があると判定されたものは2要因で「Landing Flap 展開高度」と「500 ft における Target に対する速度」であった。乖離度が大きいものは、Landing Flap 展開高度が低い傾向にあり、また、500ft における Target に対する速度は高い傾向にあった。いずれも通常の着陸操作を考えると納得がいくものではある。その一方、着陸前のエネルギーとの関係は認められないなど、直感とは異なるような結果も示された。関連を示すためには、データ数が必要であり、今回の128件のデータでは不足していた可能性もあるが、少なくとも明確に関連はないということがわかる。さらなる分析は今後の検討課題である。

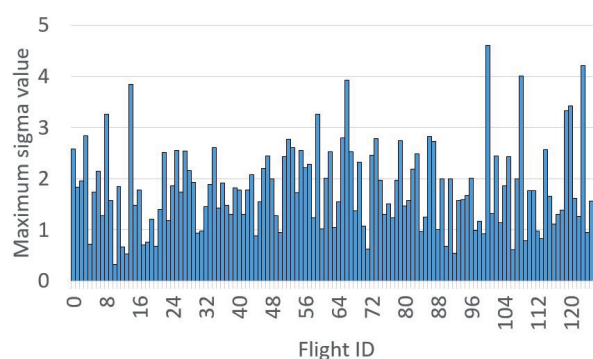


図8 各フライトの乖離度（縦方向）

5 まとめ

本稿では、回帰型ニューラルネットワークを用いることで、フライトデータの中から風などの飛行環境を考慮した上で、他と異なるものを抽出する試みを行った。その結果、横方向の運動については、事前に不安定と分類されたフライトがなかったにも関わらず、ローカライザーの飛びにより機体が一時的に不安定となっていたことが示された。縦方向の運動については、横方向ほど明確な関連事象は発見されなかったものの、一部指標について乖離度との関連が示された。これらは本手法の有効性を示すものであると考える。今後は、さらに多くのデータやさらに多くの観点から分析を行い、有益な情報を得ることを目標としたい。

参考文献

- [1] Boeing, “Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959 – 2017”, 2017.
https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf
- [2] International Civil Aviation Organization, “Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations (PANS-OPS),” 2010.
- [3] International Air Transport Association, “Unstable Approaches Risk Mitigation Policies, Procedures and Best Practices 3rd Edition,” 2017.
- [4] Airbus, “Flying stabilized approaches”, http://www.smartcockpit.com/docs/Flying_Stabilized_Approaches.pdf