フライトシミュレータソフトによる模擬飛行データの利用可能性に関する研究

A Study on Availability of Flight Data Mimicked by a Flight Simulator Software

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1200177 横山 大知

1. はじめに

交通需要の増加に伴い混雑や運航効率の低下が問題となっている.これらを改善するには、管制官が航空機の軌道を 出発前にあらかじめ予測できる必要がある.航空機は機体に 搭載されている飛行管理システム FMS (Flight Management System) に従って飛行しているが、その計算ロジックは公開 されていない.この FMS を再現することができれば、航空 機の飛行プロファイルを地上で飛行前に把握することがで き、航空路上のポイントの通過時刻あるいは到着時刻を正確 に予測することが可能となる.

本研究の目的は, FMS が模擬された市販のフライトシミュ レータソフト X-PLANE11 による模擬飛行のデータが軌道予 測の正解値として利用可能か最適軌道の観点から検証する ことである.

実際の航跡データとしては、レーダーデータや ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast)データが利用可 能であるが、機上で記録された飛行データに比べ記録されて いる情報が限られ、飛行プロファイルを計算するために必要 なパラメタが十分に得られない、フライトシミュレータソフ トにより、実際の飛行を正確に模擬できることが示されれば、 飛行性能に関する詳細なパラメタを含む模擬飛行データを 実際の飛行データとみなして利用することが可能となり、 種々の飛行条件における飛行データも容易に得られるため、 軌道予測の計算精度の向上に貢献することが期待される.

2. フライトシミュレータによる模擬飛行

最初に、本研究で重要なコストインデックス (Cost Index) について説明する.運航コスト*Cost*は、燃料流量 μ 、時間t(飛行開始時刻 t_0 ,飛行終了時刻 t_f)、燃料の価格 C_{fuel} [cent/lb]と時間当たりのコスト C_{time} [dollar/hour]を用いて、

$$Cost = C_{fuel} \int_{t_0}^{t_f} \mu dt + C_{time} \int_{t_0}^{t_f} dt$$
(2.1)

と表される.第1項が燃料コスト,第2項が時間コストに当たる.運航にかかる燃料コストと時間コストのトレードオフを決めるパラメタとして,FMSにはコストインデックスCIが入力される.このCIは燃料の価格C_{fuel}と時間当たりのコスト C_{time}を用いて次式で表される.

$$CI = \frac{C_{time}}{C_{fuel}} \tag{2.2}$$

FMS は運航コストを最小にする飛行プロファイルを計算し, 自動飛行システム (Autopilot system) に指示する.

本研究では、まず Airbus 社の技術書⁽¹⁾に従って、コストイ ンデックスを 0,25,45,80 と変化させて模擬飛行を行う. 2.1 フライトプランの作成

前提条件として,飛行区間は福岡空港(RJFF)から東京国際空港(RJTT)とし,使用機体はA320とする.この機体モ

デルは X-PLANE11 で使用可能な有償のプラグインである.

まず, Flightradar24⁽²⁾に記録されているデータから,なるべく迂回が少なく巡航高度の変更もない, FMS のコマンドに従って飛行していると予想される便を選ぶ. 巡航高度 37,000ft である 2019 年 10 月 7 日の SFJ40 便の飛行データを参考にする.この日の天候は,晴れ,風ありであるが,本研究では快晴,風なしの条件で飛行する.

このデータを参考にして、Sim Brief³⁾でフライトプランの 作成を行った後に、TOPCAT⁽⁴⁾により離陸速度を決定する.

以下の表 2.1 に模擬飛行の諸条件をまとめる. Table 2.1 Flight conditions

Table 2.1 Flight conditions											
Item	Aircraft	Departure / Runway	Arrival / Runway	Weather	Wind						
Information	A320	Fukuoka(RJFF) / 16	Tokyo INT(RJTT) / 34L	Sunny	None						
Item	Zero fuel weight	Total fuel weight	Payload weight	Cruise altitude	Cost index						
The m	Zero ruer weight	rourraer weight	1 uyioud weight		COSt Index						
Information	56,000 kg	10,150 kg	12,200 kg	37,000 ft	0, 25, 45, 80						

2.2 模擬飛行

模擬飛行では, FMS のコマンドに従うオートパイロットを 使用する.オートパイロットは, LNAV による水平方向の経 路制御や VNAV による鉛直方向の制御,高度や速度の制御 などを自動的に行う.そのため,方向舵であるエルロン,ラ ダー,エレベーターを自動的に動かしたり,スロットルを自 動的に調整したりする.したがって,オートパイロットでは, 人の手を使用した操縦なしで飛行することができる.

A320 では離陸のみ手動で行う必要があるため,離陸から 高度 100ft までは手動で,高度 100ft から着陸まではオート パイロットで飛行する.オートパイロットによる飛行中,ス イッチなどの切り替えは手動で行う.なお,このスイッチの 切り替えは FMS のコマンドを乱すような操作ではない.

2.3 データ取得

取得したデータを以下の表 2.2 に示す. Table 2.2 Acquisition data

Table 2.2 Requisition data											
Data	Unit	Symbol		Data	Unit	Symbol					
Angle of attack	[deg], [rad]	α		Lift-drag ratio	[-]	L/D					
Barometic altitude	[ft],[m]	H_p		Longitude	[deg], [rad]	φ					
Ambient atmospheric pressure	[Pa]	р		Mach number	[-]	М					
Ambient air temperature	[°C], [K]	Т		Payload weight	[lb],[kg]	m_{pld}					
Drag coefficient	[-]	CD		Pitch angle	[deg], [rad]	θ					
Lift coefficient	[-]	CL		Total time	[s]	t					
Aircraft weight	[lb],[kg]	т		Indicated airspeed	[kt], [m/s]	VIAS					
Atmospheric density	[kg/m ³]	ρ		Flight path climb angle	[deg], [rad]	γ					
Empty weight	[lb],[kg]	m_{emp}		True airspeed	[kt], [m/s]	V_{TAS}					
Fuel weight	[lb],[kg]	m_{fuel}		Ground speed	[kt], [m/s]	V_{GS}					
Latitude	[deg], [rad]	λ		Vertical speed	[fpm],[m/s]	V_{VI}					

3. 実用性の検証

コストインデックスの変化による飛行プロファイルすな わち高度および速度の変化を調べる.その後,模擬飛行デー タと計算値を比較し,模擬飛行データの妥当性を検証する.



模擬飛行により取得したデータについて、図3.1 に3 次元 の飛行経路を、図 3.2 に速度の時間履歴を実線で示す.図 3.2 では飛行状態が分かりやすいように高度を点線で示す.





式(2.2)より、コストインデックスが小さいほど、燃料コストを重視した飛行、つまり時間はある程度かかっても燃料消費をなるべく抑えた飛行となる.燃料消費量は大きな推力を必要とする上昇と巡航で多いため、コストインデックスが小さいほど巡航開始と降下開始が早くなり、推力がアイドル値に近くなる燃料消費の少ない降下フェーズが長くなる.この傾向が図 3.1 で見られることから、コストインデックスの変化による高度のプロファイルの変化には妥当性があると考えられる.





一方,式(2.2)よりコストインデックスが大きいほど,時間 コストを重視した飛行になる.したがって,コストインデッ クスが大きいほど速度が速く,飛行時間が短い傾向がある. この傾向が図 3.2 から見られるため,コストインデックスの 変化による速度のプロファイルの変化についても妥当性が あると考えられる.

コストインデックス0の降下開始時点では、速度が上昇しないことが示されている⁽⁵⁾.しかし、図 3.2 では速度が上昇 している.したがって、コストインデックスの変化による速 度プロファイルの変化において、コストインデックス0の時 の信用性は薄いと考えられる.しかし、実際の飛行でコスト インデックスを0にすることはないため、本研究において問 題はないと考えられる.

3.2 模擬飛行データと計算値の比較

代表値として、コストインデックス 25 における模擬飛行 データと計算値の比較を示す. 模擬飛行データは実線、計算 値は点線で示す.また,燃料流量の計算には欧州航空航法安 全機構(EUROCONTROL)が開発した BADA モデル⁽⁶⁾を用 いる.

総重量mは空虚重量 m_{emp} , ペイロード重量 m_{pld} , 燃料重量 m_{fuel} の和である.したがって, 総重量は

 $m = m_{emp} + m_{pld} + m_{fuel}$ (3.1) で表される.大気パラメタについては、取得した模擬飛行デ ータの大気圧p、大気密度 ρ 、大気温度Tと、国際標準大気モ デルを用いて模擬飛行データの気圧高度から計算した値と を比較する.縦の運動に関して、飛行経路上昇角 γ (以下,経 路角),鉛直方向速度 V_{VI} 、ピッチ角 θ について比較を行う. 経路角は真対気速度 V_{TAS} の鉛直方向成分を取るので、気圧高 度 H_n 、時間tを用いて、

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{1}{V_{TAS}} \frac{\mathrm{d}H_p}{\mathrm{d}t} \right) \tag{3.2}$$

と表される. 鉛直方向速度V_{VI}については

$$V_{VI,cal1} = \frac{\mathrm{d}H_p}{\mathrm{d}t} \tag{3.3}$$

$$V_{VI,cal2} = V_{TAS} \sin \gamma \tag{3.4}$$

の2パターンで表される. ピッチ角 θ は迎角 α と経路角 γ の和 であるので,

$$\theta = \alpha + \gamma$$
 (3.5)
と表される. 比燃料消費率 η は真対気速度 V_{TAS} の関数なので,
推力比燃料消費率 C_{f1}, C_{f2} を用いて,

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}}\right) \tag{3.6}$$

で表される. 抗力Dは定義より, 大気密度 ρ , 翼面積S, 抗力 係数 C_D を用いて,

$$D = \frac{1}{2}\rho V_{TAS}^2 S C_D \tag{3.7}$$

で表すことができる. 推力*Thr*は運動方程式より, 総重量*m*, 時間*t*, 重力加速度*g*, 経路角γを用いて,

$$Thr = m \frac{\mathrm{d}V_{TAS}}{\mathrm{d}t} + D + mg\sin\gamma \tag{3.8}$$

で表される. また, 最大推力*Thr_{max}*は気圧高度*H_p*の関数であり, 最大上昇推力係数*C_{Tc.1}*, *C_{Tc.2}*を用いて,

$$Thr_{max} = C_{Tc,1} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{Tc,2}} + C_{Tc,3} \times H_p^2 \right)$$
(3.9)

で表される.これを用いて、上昇フェーズでは、上昇時のノ ミナル燃料流量µ_{nom,cim}

$$_{nom,clm} = \eta \times Thr \tag{3.10}$$

と最小燃料流量µmin(降下燃料流量係数Cf3, Cf4を用いる)

$$\mu_{min} = C_{f3} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{f4}}\right) \tag{3.11}$$

のうち大きい方を取り、上昇時燃料流量 μ_{clm} は

и

$$\mu_{clm} = \max(\mu_{nom,clm}, \mu_{min}) \tag{3.12}$$

で表すことができる.巡航フェーズでの燃料流量 μ_{crz} は、巡航燃料流量修正係数 C_{fcr} を用いて、

$$\mu_{crz} = \mu_{clm} \times C_{fcr} \tag{3.13}$$

で表される.降下フェーズでは、降下時のノミナル燃料流量 $\mu_{nom,des}$ (高高度降下推力係数 $C_{Tdes,high}$ を用いる)

$$\mu_{nom,des} = \eta \times C_{Tdes,high} \times Thr_{max}$$
(3.14)

と式(3.11)の最小燃料流量のうち大きい方を取り、降下時燃料流量 μ_{des} は

$$\mu_{des} = \max(\mu_{nom,des}, \mu_{min}) \tag{3.15}$$

で表すことができる.以上の式(3.1)から式(3.15)までの



上図 3.3(viii)において,緑色の実線は模擬飛行データの総 燃料重量を時間で微分したものであり,赤色の実線はこれを ガウシアンの加重平均で平滑化したものである.

コストインデックス 0,45,80 に関しても図 3.3 と同様の 傾向が得られた.

どの項目についても模擬飛行データと計算値がほとんど 一致していることがわかる.この他にも空力データC_L, C_Dお よび揚抗比L/Dに関して比較を行ったが模擬飛行データと 計算値が全く異なる結果となった.空力データは航空機にお いて機密性の高いデータであるため、本研究で用いたシミュ レータからはダミーのデータが出力されている可能性が高 い.空力データが異なるということは、機体モデルが異なる ということであり、データの信用性がなくなる.しかし、空 カデータ以外のパラメタ、特に燃料流量は BADA モデルと の整合性が示されたため、ソフトウェア内で行われているシ ミュレーションにおいてはある程度精度の良い空力モデル が使用されていると考えられる.

4. 結論

本研究では、市販のフライトシミュレータソフト X-PLANE11 内で動作する A320 の飛行データが、軌道予測の正 解値として利用可能か最適軌道の観点から検証した.国際標 準大気モデルや運動に関する力学的な関係式および BADA モデルによる検証結果より、上記機体モデルによる模擬飛行 データの信憑性を確認することができた.

以下の図 4.1 は, Flightradar24 に記録された 2019 年 10 月 7 日のある便の実飛行データ(赤線)とコストインデックス 25 における模擬飛行データ(青線)を比較したものである. 高度変化や速度変化に関して合致している部分が多く見ら れる.また,偏西風による追い風の影響を受けた実飛行が, 風の影響を無視した模擬飛行よりも飛行時間が短く,速度が 速くなっている.したがって,軌道予測の正解データとして 利用するためには,天候と風を考慮した検証が必要不可欠で あるが,模擬飛行データの研究への有用性は十分あると判断 できる.



文献

- cost index, Airbus (参照日: 2019年10月8日) https://ansperformance.eu/library/airbus-cost-index.pdf
- (2) Flightradar24(参照日:2019年10月8日) https://www.flightradar24.com
- (3) Sim Brief (参照日: 2019年10月8日) https://www.simbrief.com/home/
- (4) TOPCAT(参照日:2019年10月10日) http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/
- (5) 混雑空港における効率的な到着管理システムの実用化 に関する研究,九州大学大学院工学府航空宇宙工学専 攻修士論文,樋口雄紀,(2017), p.16
- (6) USER MANUAL FOR THE BASE OF AIRCRAFT DATA (BADA) REVISION 3.14, EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, (2017), p. 22-28.

