卒業論文要旨

CARATS Open Data と QAR 飛行データを用いた高精度な飛行状態推定法の確立

Establishment of Highly Accurate Method of Flight State Estimation by using CARATS Open Data and QAR Flight Data

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1220057 菊谷 尚暉

1 はじめに

現行の航空交通システムでは、アジア諸国の経済発展等に よる航空交通量の増大による遅延の発生等、問題点が顕在化 しつつあったことから平成 22 年に国土交通省は「将来の航 空交通システムに関する長期ビジョン(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems, CARATS)」をとりまと め、研究開発の活性化のため定期航空便の時刻・位置等の航 跡データ CARATS Open Data を提供している⁽¹⁾⁽²⁾. 航跡デー タから対気速度や燃料などの詳細な情報を得るには、気象デ ータや機体性能モデルより推定を行う必要があるが、多数の 便を用いてこの飛行状態量の精度評価が行われた例はなく、 推定の精度は明らかにされていない.

本研究は、航空会社より提供を受けた機上で記録された QAR (Quick Access Recorder)データを真値として、CARATS Open Data から複数の方法を用いて飛行状態量の推算を行い、 精度評価を行うことによって航跡データのみから高い精度 で飛行状態量を推定する方法を確立することを目的とする. これにより、最適軌道との比較による運航効率の評価といっ た飛行状態推定を用いた研究精度の向上に貢献することが 期待される.

2 飛行状態推定法

2.1 利用データとモデル

解析対象とした便の概要を表1に示す.ただし,空港名に 関しては国際航空運送協会が定める3レターコードを用いて いる.解析便数は,計517便である.

飛行状態推定には、CARATS Open Data 2017 を用いた. CARATS Open Data は主に一次レーダによって取得されたデ ータであり、時刻、地理緯度、経度、気圧高度、型式、仮想 便名の6つのデータが約10秒周期で記録されており、機器 の誤差や座標変換による誤差等が含まれている.一方、推定 精度の評価においては、誤差が小さく詳細なデータとして日 本航空株式会社より提供を受けたQAR データを用いた.な お、QAR データは非常に機密性が高く、非公開である.

風を考慮するための気象データとしては、気象庁が提供す る数値予報 GPV (Grid Point Value) データを用いた.数値予 報モデルとして、GSM (Global Spectral Model)(日本域)と MSM (Meso-Scale Model)を用いた.GSM と MSM では、 MSM の方が配信間隔は短く、格子間隔も細かいという特徴 がある⁽³⁾⁽⁴⁾.本研究では、気象データの現況値を空間、時間 方向に内挿することで任意の点における風速および気温の 値を求め状態量推定の計算に用いた. Table 1 Analysis Object

Route	From FUK to HND		
Aircraft type	B777-200		
	Apr 17th to 23rd, 2017	(68)	
Period (Number of flights)	May 8th to 14th, 2017	(25)	
	Jun 12nd to 18th, 2017	(38)	
	Jul 10th to 16th, 2017	(68)	
	Aug 14th to 20th, 2017	(18)	
	Sep 11th to 17th, 2017	(16)	
	Oct 9th to 15th, 2017	(69)	
	Nov 13th to 19th, 2017	(41)	
	Dec 11th to 17th, 2017	(41)	
	Jan 9th to 14th, 2018	(60)	
	Feb 5th to 11th, 2018	(36)	
	Feb 26th to Mar 4th, 2018	(37)	

機体性能モデルには、欧州航空航法安全機構が維持・管理 する BADA (Base of Aircraft Data) モデルを用いた⁽⁵⁾

2.2 推定手順

飛行状態推定の手順を図1に示す.まず, CARATS Open Data の緯度, 経度から距離を算出し, 飛行時間で微分することで対地速度を推算する.次に,対地速度の平滑化後,対地速度に鉛直方向速度および風の影響を考慮し, 真対気速度を推算する.さらに, 質点近似運動方程式, BADA モデルを用いることによって燃料流量を推算し,その時間積分によって燃料消費量を推算する.



Figure 1 Flight State Estimation

対地速度の推算には、距離の算出に、国土地理院が用いて いる測地線長の計算式 (GSI)⁽⁶⁾⁽⁷⁾, Hubenyの厳密解 (EH) ⁽⁸⁾, Hubenyの簡略式 (SH)⁽⁹⁾,地球を完全な球体としてモデ ル化し、距離を算出する方法 (PS),緯度経度の差に地球半 径をかけ、三平方の定理から求める方法(PT)の計5つの方法を用い最も精度の良い方法を明らかにした.PS, PTでは、地球を真球と仮定しており、距離算出の際の誤差の影響を考慮し、地理緯度を地心緯度に変換した.

対地速度の平滑化には、ガウシアンフィルタ、メジアンフ ィルタ、移動平均、εフィルタおよびそれらを組み合わせた フィルタを用いて精度評価を行い、最も効果の高いフィルタ を明らかにした⁽¹⁰⁾.

真対気速度の推算においては,GSM と MSM を用いて精 度評価を行い,最も精度が良い方法を明らかにした.また, 気象データの精度評価や,真対気速度の平滑化を行った場合 についても検討を行った.

燃料の推算においては,真対気速度の平滑化を行った場合 と行わない場合について,それぞれ最大推力で制限を設定し た場合としない場合の4つの場合で精度評価を行った.

2.3 誤差の評価指標

誤差の評価指標として ME (Mean Error) および RMSE (Root Mean Square Error) を用いる. ME は, CARATS Open Data か ら推定した値y_{CARATS}[*i*]と, y_{CARATS}[*i*]の時刻に最も近い QAR データの値y_{OAR}[*i*]を用いて

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{CARATS}[i] - y_{QAR}[i])}{n}$$
(1)

と表される. RMSE は同様に,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{CARATS}[i] - y_{QAR}[i])^2}{n}}$$
(2)

と表される. ただし, nはデータ数である.

3 解析結果

3.1 対地速度

図2にある一便の推定した対地速度とQAR データの対地 速度の比較結果を示す.横軸は時刻[日本標準時(JST)], 縦軸は対地速度[m/s]である.また,表2に対地速度の誤差を 示す.回転楕円体を仮定したGSI,EH,SHは,精度が同一 であることがわかる.ただし,SHでは高緯度,長距離で精 度が劣化する可能性がある⁽⁹⁾.またPSのMEの平均値が劣 化したことから,地球を真球と仮定した場合には僅かに精度 が劣化すると考えられる.PTは,緯度変化による経度1度 の距離の変化を考慮しないため,他の4つの方法に比べて著 しく精度が劣化している.したがって,長距離,高緯度で精 度の劣化の可能性が低い⁽⁷GSIの使用が最も適していると考 えられる.



Figure 2 Comparison of Ground Speed

Table2 Error of Ground Speed

	ME [m/s]		RMSE	[m/s]
method	mean	SD	mean	SD
GSI	0.5664	0.3228	15.2541	2.6368
EH	0.5664	0.3228	15.2541	2.6368
SH	0.5664	0.3228	15.2541	2.6368
PS	0.8024	0.3212	15.2804	2.6380
PT	39.1810	2.3468	48.2653	2.9562

推算した対地速度には、インパルス性雑音(12)が含まれてい ると考えられることからノイズ除去のため平滑化を行う.最 適なフィルタおよびフィルタ窓を求めるために計 11 種類の フィルタを用いて平滑化後の対地速度の精度評価を行った. 表 3,表 4 に,距離計算に GSI を用いて対地速度を推算し, フィルタを1段で適用して平滑化した場合と2段で適用して 平滑化した場合の評価結果を示す.ここで,フィルタ窓は517 便の RMSE の平均値が最も小さくなった場合の窓数を示し ており、SMA は移動平均を表している. どのフィルタを用 いた場合でもMEは表2の平滑化前のGSIと大きな差異はな く,不適切な平滑化は行われていない.また,非線形フィル タであるメジアンフィルタを用いた場合に精度が良くなっ ており、インパルス性雑音の除去が精度を向上させていると 考えられ, RMSE の平均値が最小となるメジアンフィルタを 2段で適用する方法が対地速度のノイズ除去に最も適してい ると考えられる.

Table 3 Error of GS (1stage filter)

		ME [m/s]		RMSE	[m/s]
Name	Order	mean	SD	mean	SD
Median	17	0.5636	0.3525	2.7405	0.4646
Gaussian	25	0.5826	0.3221	3.6802	0.5096
SMA	15	0.5754	0.3224	3.9309	0.5340
ε _{mean}	22	0.4607	0.3458	14.6001	2.7563
€ _{median}	21	0.3419	0.3970	14.7305	2.7338

Table 4 Error of GS (2stage filter)

		ME [m/s]		RMSE	[m/s]
Name	Order	mean	SD	mean	SD
Median	9, 19	0.5714	0.3684	2.6654	0.4864
Gaussian	19, 17	0.5757	0.3220	3.6673	0.5091
SMA	13, 11	0.5761	0.3223	3.6725	0.5058
Median-	17, 1	0.5634	0.3524	2.7704	0.4624
ε _{mean} Median-	17, 1	0.5640	0.3514	2.7733	0.4607
ε _{median} Median-	11, 11	0.5814	0.3507	2.5047	0.4406
Gaussian					

3.2 真対気速度

まず, 真対気速度に用いる気象データの精度評価の結果を 示す. ただし, 気象データそのものの誤差を確認するため風 速の推算に必要な変数については QAR データの値を用いた. また, 正確に記録されていないデータを除くため, おおよそ の離陸速度である IAS (Indicated AirSpeed) が 140 kt 以上の 範囲を対象として解析を行った.

表5に風速の誤差を示す.meanは平均値,SDは標準偏差, ALL は風速の大きさ,EW は風速の東西成分,NS は風速の 南北成分を示している. GSM と MSM で誤差に大きな差異は ない. しかし, RMSE については MSM が GSM よりも小さ い値を取っている. また, MSM の方が ME および RMSE の 標準偏差は小さくなっており, 誤差のばらつきが小さい. し たがって, GSM, MSM の精度の差は微少ではあるものの, 誤差のばらつきを考慮すると, MSM の精度が高いと考えら れる.

Table 5 Error of Wind Speed					
		ME [m/s]		RMSE	[m/s]
	Model	mean	SD	mean	SD
ALL	GSM	-1.0574	0.9187	3.0244	0.9480
	MSM	-1.0760	0.7612	2.7089	0.7739
EW	GSM	-0.6632	0.8955	2.9135	0.9273
	MSM	-0.8044	0.7416	2.5909	0.7547
NS	GSM	0.0598	1.0831	2.9676	1.0009
	MSM	0.0569	0.8460	2.5827	0.6496

表6に真対気速度の誤差を示す.また、図3、図4にある 一便の真対気速度の推定結果と517便の真対気速度の誤差の 分布を示す.図4の横軸はME [m/s],縦軸はRMSE [m/s] である.真対気速度の推算結果からもGSM,MSMの誤差に 大きな差異がないことがわかる.MEおよびRMSEの標準偏 差が小さいこと、また、原則として配信間隔が短くより新し い時間のデータを用いることができ、かつ分解能の高い数値 予報モデルの結果の利用を推奨されていること⁽⁴⁾から、GSM よりも配信間隔が短く、格子間隔も細かいMSMの精度が高 いと考えられる.



Figure 4 Error of TAS(517 flights)

表7に、MSM を用いて推算した真対気速度にフィルタを 適用した場合の誤差を示す.ただし、フィルタ窓はそのフィ ルタを用いた時に RMSE が最も小さくなるフィルタ窓数を 示しており、誤差はそのフィルタ窓で平滑化した場合の値で ある.どのフィルタを適用した場合でも RMSE の平均値が表 6 の平滑化前の MSM の値よりも小さくなっている.メジア ンフィルタの ME の劣化からも真対気速度では、線形フィル タが適切であると考えられ、ME および RMSE の平均値が最 も小さいガウシアンフィルタを用いることで精度が向上す ると考えられる.

Tabla	7 Frene	ofemon	thad TA	C
Lanc	/ 191101	UI SHIUU		

Table 7 Error of smoothed TAS					
		ME [m/s]		RMSE	[m/s]
Name	Order	mean	SD	mean	SD
Median	17	1.1672	0.8184	3.3797	0.6617
Gaussian	13	1.1482	0.8181	3.3068	0.6722
SMA	9	1.1496	0.8182	3.3159	0.6667

3.3 燃料

図5にある一便の推定した燃料流量の結果を示す. 真対気 速度の平滑化を行わない場合が case1, case2, 行った場合が case3, case4 であり. case2 と case4 は推力を BADA の最大 推力で制限している. 最大推力で制限を設定した場合には, 最大推力での制限が一種のフィルタのような挙動を示して いることがわかる. これは, 過大に推定された推力が最大推 力で制限されることで燃料流量が過大に推定されることが 無くなったためであると考えられる. また, 真対気速度の平 滑化を行った場合は, 行わない場合と比較してノイズが低減 されている.



Figure 5 Comparison of Fuel Flow

表8に各 case での燃料流量の誤差を示す.最大推力で制限を設定した case2 と case4 では, RMSE の平均値は改善され, ME のばらつきに関しても小さくなっており,最大推力で制限を設定することで精度は向上すると考えられる.また,真対気速度の平滑化を行う case4の RMSE は最も小さいことから,燃料流量の解析においては,真対気速度の平滑化を行

い,最大推力で制限を設定することで精度が良くなると考えられる.

	ME [kg/s]		RMSE [kg/s]	
case	mean	SD	mean	SD
1	0.0220	0.0549	0.5179	0.0776
2	-0.0263	0.0454	0.4141	0.0561
3	-0.0115	0.0530	0.3080	0.0365
4	-0.0237	0.0465	0.2955	0.0358

Table 8 Error of Fuel Flow

表9に各 case での燃料消費量の誤差を示す. FCE_{med}は燃料消費量の誤差の中央値,QD は四分位偏差を表している. 最大推力で制限を設定した case2 や case4 は,誤差の中央値 は他に比べて少し劣化しているが,四分位偏差や誤差が± 5%以内となった便数に着目すると,誤差のばらつきが小さ くなっていることがわかる.よって,最大推力で制限を設定 した場合に精度が良くなると考えられる.ただし,真対気速 度の平滑化の有無による精度に大きな差異はない.

Table 9 Error of Fuel Consumption

case	FCE _{med} [%]	QD [%]	Within±5%
			[flights] (%)
1	0.9172	1.9720	461 (89.2)
2	-1.4431	1.5752	491 (95.0)
3	-0.8177	1.7162	479 (92.6)
4	-1.3026	1.5499	487 (94.2)

図6に燃料消費量の誤差が最も大きくなった便の燃料流量 について、QAR データの機体質量を用いて推算を行った場 合との比較結果を示す.ただし case4 の条件で解析を行った. 初期機体質量を QAR データの機体質量に設定した場合には, 巡航フェーズにおいて QAR データと合致していることが確 認でき,精度が向上していることが分かる.よって,燃料流 量の推定精度には,質量が大きく影響しており,正確な機体 質量を用いることで燃料流量の推定精度を向上させること ができると考えられる.



Figure 6 Fuel Flow (Maximum error)

また,図7にQAR データに格納されている機体質量を BADA参考質量に対する比として示す.本研究で対象とした 解析路線,機種に限られた結果ではあるが,BADA参考質量 と等しい値を取っている便はなく,BADA参考質量よりも 5%程度小さい質量である便が多い.したがって,全便に対 し同じ機体質量の仮定は適当ではなく燃料流量の誤差のば らつきが大きくなると考えられる.



Figure 7 The ratio of QAR mass to BADA mass

4 まとめ

国土交通省航空局が提供する CARATS Open Data を用いた 高精度な飛行状態推定法を確立するため、複数の計算方法や 気象データを仮定して飛行状態量を推算し、それぞれの精度 を QAR 飛行データより求め比較、検証した.対地速度につい いては、回転楕円体を考慮した計算式、真対気速度について は、MSM を用いた場合に高精度に推算できた.最後に BADA モデルによる燃料の推算について精度の検証を行なった.燃 料流量については、真対気速度の平滑化を行い、最大推力で 制限を設定した場合に精度が高くなり、燃料消費量について は、最大推力で制限を設定行った場合に精度が良くなると考 えられる.ただし、燃料消費量の解析時には、真対気速度の 平滑化を行う効果は少ないと考えられる.最大推力モデルに より推力を制限し、真対気速度の平滑化を行わない場合の燃 料消費量の誤差は、中央値が約-1.4%、四分位偏差が約 1.6%、 ±5%以内に入った便が約 94%となった.

今後は、BADA3 だけではなく、BADA4 を用いた場合の精 度についても検討を行う必要がある.また、燃料の推算には 機体質量が大きく影響を及ぼしていると考えられるため、位 置データから正確な機体質量を推算するための方法を開発 し、更なる精度向上に繋げたい.本研究では路線、飛行方向、 機種については同条件の便を用いて精度評価を行ったため、 条件が異なる場合の精度についても検討が必要である.

本研究の成果は大規模な航跡データを用いた運航効率の 正確な分析を可能とし,現行システムにおいて削減可能な燃 料等の改善点を明確化することに寄与するものである.

謝辞

本研究では、国土交通省航空局より提供を受けた CARATS Open Data,京都大学生存圏研究所が提供する気象庁数値予 報データ、欧州航空航法安全機構が維持、管理する機体性能 モデル BADA3,日本航空株式会社から提供を受けた QAR デ ータを使用いたしました.これらの機関が提供する便宜に謝 意を表します.

文献

(1) 航空交通システム研究会、"将来の航空交通システムに 関する長期ビジョン一戦略的な航空交通システムへの変 革一"、(2010).

- (2) 岡恵,福田豊,上島一彦,"航空交通データ(CARATS Open Data)の提供と研究開発への活用",日本航空宇宙学会誌, Vol. 68, No. 4 (2020), pp.94-100.
- (3) 十時寛典,小塚智之,宮沢与和,船曳孝三,"定期便フライトデータと気象庁数値予報 GPV データとの比較評価",航空宇宙技術, Vol. 12 (2013), pp.57-63.
- (4) 気象庁情報基盤部 数値予報課, "令和 2 年度数値予報 解説資料集", 気象庁情報基盤部 (2021).
- (5) Eurocontrol Experimental Centre, "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision3.14 "(2017).
- (6) 国土地理院, "距離と方位角の計算", https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.ht ml, (参照日2021年1月23日).
- (7) B. R. Bowring, "TOTAL INVERSE SOLUTIONS FOR THE GEODESIC AND GREAT ELLIPTIC", Survey Review, Vol. 33, No. 261 (1996), pp461-476.

- (8) 日本測量協会創立 30 周年記念「現代測量学」出版委員会,"現代測量学 第 4 巻(測地測量 1)",日本測量協会 (1988).
- (9) 三浦英俊, "緯度経度を用いた 3 つの距離計算方法", オペレーションズ・リサーチ, Vol. 60, No. 12 (2015), pp.701-705.
- (10) 原島博, "信号処理教科書 不規則信号とフィルタ ", コロナ社 (2018).
- (11) 福田豊, 蔭山康太, 山本哲士, 宮津義廣, 行木宏一, "運 航実績データによる飛行距離の測定手法の検討", 電子 航法研究所発表会 (2007).
- (12) 近藤啓子,長谷山美紀,北島秀夫,"インパルス性雑音除去のための非線形フィルタによる雑音検知に関する考察(映像メディアおよび一般インターネット,デジタル放送,マルチメディア,三次元画像,視覚と画質評価,ITS等)",映像情報メディア学会技術報告, Vol. 26.9 (2002), pp. 43-48.