

卒業論文要旨

航空機の位置データを用いた離陸重量の推定

Estimation of Aircraft Takeoff Weight using Position Data

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1200112 西田 百花

1. 序論

現在、世界中で航空機の利用が増加しており、今後も航空機の需要が増加し続けると予想されている。高知空港においても旅行者数は増加の傾向にある⁽¹⁾。航空機は管制官によって安全な運航が行われているが、航空交通量の増加によって、管制官一人当たりの負担が増えることとなる。日本では国土交通省航空局によって将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS：Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems）が掲げられており、運航効率の向上を実現するための航空交通システムの改善に向けた研究開発が行われている⁽²⁾。CARATS 施策導入計画⁽³⁾の中に、現在行われている空域ベースでの運用から軌道ベース運用（TBO：Trajectory Based Operations）への移行が含まれている。空域ベース運用では分割された空域ごとの管制指示を行っている一方、軌道ベース運用では国の飛行情報区全体を一つの空域と捉え、すべての航空機の出発から到着までを一体的に管理する。全飛行区間に時間管理を導入した「4次元軌道」に基づいた運用で航空機ごとの最適な軌道を設定できる⁽⁴⁾。運航ダイヤの設定時から軌道を調整することで運航者の希望する飛行が可能となる。飛行中はあらかじめ計画した軌道を調整し、気象の変化などの状況変化に対応した軌道修正を行う。これにより、最低限の燃料で運航できるために地球温暖化の問題にも対応でき、混雑空港や混雑空域における航空交通量の増加が見込める。正確な軌道予測を実現するためには航空機の運航重量のデータは重要になってくる。しかし、運航重量は管制において使用されるレーダーデータには含まれておらず、真値を得られないのが現状である。

本研究では正確な軌道予測を行うために航空機の離陸重量の推定を目的とする。

将来様々な路線を解析していくときにレーダーデータである CARATS Open Data が利用できる可能性があるが、現在のところ離陸に必要となるターミナルレーダー情報処理システム（ARTS：Automated Radar Terminal System）のデータが含まれている最新版が羽田空港と福岡空港のみであるため、本研究は羽田-高知間の解析を行う。

2. 解析対象

航空機が滑走路（図2.1、図2.2枠内）に侵入したところを滑走開始点とみなし、そこから離陸決心速度（ V_1 ）になった時点までを離陸とみなす。 V_1 は暫定的に 140 [kt](=72.02[m/s])と設定した。表1に解析する高知-羽田便、表2に解析する羽田-高知便を示す。

Table 1 Analysis target between Kochi to Haneda.

Date	Flight number	Acquisition start time	Acquisition end time
2016.06.08	JAL496	16:10	17:19
2016.12.12	JAL490	7:13	8:18
2017.02.28	JAL492	9:42	10:48
2017.05.26	JAL492	9:53	11:12
2017.05.29	ANA568	15:40	17:09
2017.11.14	JAL494	11:45	12:54
2017.12.01	JAL490	7:25	8:21
2018.03.22	JAL490	7:14	8:15
2018.06.09	JAL494	11:39	12:57
2018.11.13	JAL494	12:06	13:19
2018.11.27	JAL496	16:30	17:37
2018.12.08	JAL492	9:47	10:46
2019.06.06	JAL496	16:21	17:46

Table 2 Analysis target between Haneda to Kochi.

Date	Flight number	Acquisition start time	Acquisition end time
2016.06.10	JAL497	19:09	19:40
2016.12.13	JAL495	14:43	16:07
2017.04.15	JAL499	19:11	20:27
2017.05.27	JAL497	17:00	18:25
2017.11.26	JAL493	9:40	10:58
2018.06.10	JAL495	14:30	15:44

3. 離陸重量の算出

3.1 手順

離陸重量の推定には Junzi Sun 著書⁽⁵⁾の推定方法を用いる。巡行飛行中、航空機には推力（T）、抗力（D）、揚力（L）、重量（W）の力が作用するのに加え、離陸中は法線力（N）とグラウンドドラッグすなわち地面との摩擦力（ D_g ）の二つの力を考慮する必要がある。 D_g は法線力 N に比例すると仮定することができるため、式(1)が得られる。 μ は摩擦係数である。

$$D_g = \mu N = \mu(W - L) \quad (1)$$

飛行機が地上にある間、垂直方向の加速度や動きはないため、水平方向の運動のみを考えればよい。平坦な滑走路と仮定すると、式(2)としてモデル化できる。

$$T_i - D_i - \mu(W - L_i) = m \cdot a_i \quad (2)$$

航空機の揚力、抗力は既知の抗力係数から計算することができる。式(3)はこれらの関係を表す。ρは空気密度、ηは推力係数、Sは翼面積、Kは誘導抗力係数である。

$$\begin{aligned} T_i &= \eta T_{max} \\ T_i &= \frac{1}{2} \rho V_i^2 S C_L \\ D_i &= \frac{1}{2} \rho V_i^2 S C_D \\ C_D &= C_{D0} + K C_L^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)は式(3)を用いて式(4)に書き直すことができる。

$$T - \frac{1}{2} \rho V_i^2 S (C_D - \mu C_L) - (\mu g + a) m = 0 \quad (4)$$

離陸中、推力は次の実験式を用いて速度の関数としてモデル化できる⁽⁶⁾

$$T = T_0 (1 - \epsilon V^2) = \eta T_{max} (1 - \epsilon V^2) \quad (5)$$

係数εは、経験的に見いだされる係数⁽⁶⁾で、正、負、またはゼロにすることができる。従って式(4)は次のようになる。

$$\begin{aligned} \eta T_{max} (1 - \epsilon V_i^2) - \frac{1}{2} \rho V_i^2 S (C_D - \mu C_L) - (\mu g + a_i) m &= 0 \\ \downarrow \\ \eta T_{max} - \left\{ \eta \epsilon T_{max} + \frac{1}{2} \rho S (C_{D0} + K C_L^2 - \mu C_L) \right\} V_i^2 & \\ - (\mu g + a_i) m = 0 & \end{aligned} \quad (6)$$

離陸距離を最小にするために、揚力係数C_Lは地面摩擦係数に関連して以下の式(7)のように最適化される⁽⁶⁾。

$$C_L = \mu / 2K \quad (7)$$

従って、式(6)は次のようになる。

$$\eta T_{max} - \left[\eta \epsilon T_{max} + \frac{1}{2} \rho S \left(C_{D0} - \frac{\mu^2}{4K} \right) \right] V_i^2 - (\mu g + a_i) m = 0 \quad (8)$$

C_{D0}とKはBADAモデルの数値を用いることができるが、a_iはV_iから推定されるためにノイズが大きい。代わりに離陸中の平均加速度を各点の近似値として使用できる。

$$m_i = f(V_i^2, \bar{a}) \quad (9)$$

従って、質量は以下の式で求めることができる。

$$m = \arg \min_m \sum_{i=1}^n [m - f(V_i^2, \bar{a})]^2 \quad (10)$$

未知数は速度V_iと加速度a_iになるので、まずはこの二つの未知数を求める。

3.2 速度・加速度の算出

速度・加速度はGPSデータから緯度・経度を用いて二点間の距離を時間微分して求める。二点間の距離dはヒュベニの式(11)を用いて求める⁽⁷⁾。

$$s = \sqrt{(M \Delta \phi)^2 + (N \cos \phi \Delta \lambda)^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} x_1, y_1 &: \text{地点1の経度と緯度} \\ x_2, y_2 &: \text{地点2の経度と緯度} \\ \Delta \phi &= y_1 - y_2 &: \text{緯度の差} \\ \Delta \lambda &= x_1 - x_2 &: \text{経度の差} \\ \phi &= \frac{y_1 + y_2}{2} &: \text{緯度の平均値} \\ M &= \frac{a(1-e^2)}{W^3} &: \text{子午線曲率半径} \\ N &= \frac{a}{W} &: \text{卯酉線曲率半径} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \mu_y} &: \text{子午線曲率半径} \\ e &= \sqrt{1 - (b/a)^2} &: \text{離心率} \\ a &= 6378137 &: \text{長半径 (赤道半径) [m]} \\ b &= 6356752.314 &: \text{短半径 (極半径) [m]} \end{aligned}$$

計算に用いる値はBADAモデルと参考文献⁽⁵⁾のものを使う。

$$\begin{aligned} \eta &= 1.0 & T_{max} &= 146.59[\text{N}] \\ \epsilon &= 2.7 \times 10^{-5} & C_{D0} &= 0.035700 \\ \mu &= 0.02 & K &= 0.042300 \\ \rho &= 1.225[\text{kg/m}^3] & S &= 124.65[\text{m}^2] \end{aligned}$$

4. 速度・加速度

図1は解析対象すべての速度変化率である。羽田から高知便においても同様、図3のように加速度の計算範囲を分けて計算した。

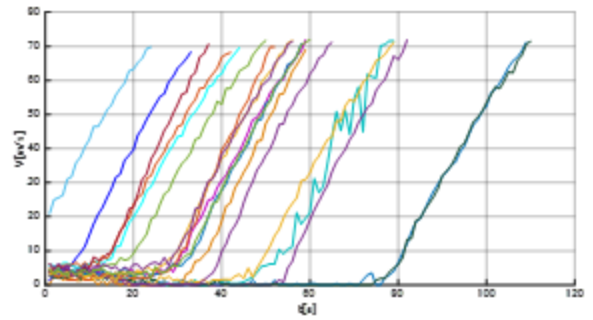


Fig 1 Speed of all analysis targets.

加速度を計算する際、計算範囲を変えると離陸重量に変化が見られたので、より正確な離陸重量を求めるために加速度を計算する範囲を限定した。図2、図3は、一番データの数が多き日に合わせて重ねたものである。線形になっている部分を二つに分け、加速度の増減が変わるところ境に計算範囲①と②に決定した。

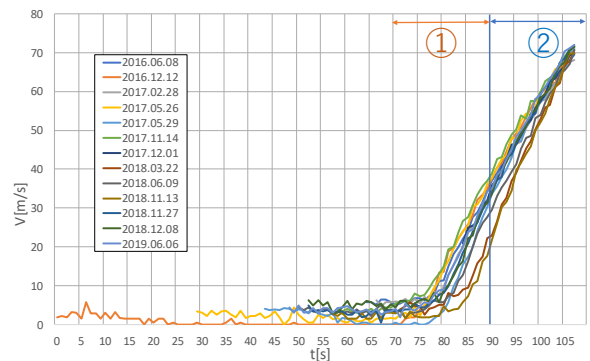


Fig 2 Superposition of speed change rate results (Kochi to Haneda).

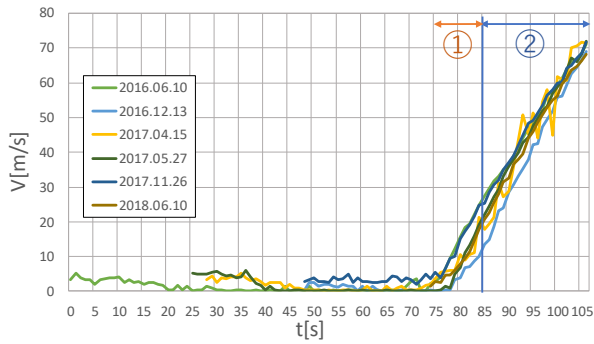


Fig 3 Superposition of speed change rate results (Haneda to Kochi).

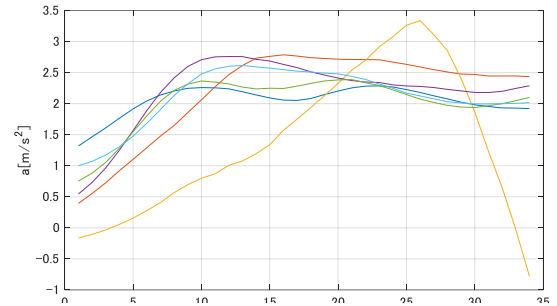


Fig 5 Accel of range ①+② (Haneda to Kochi).

5. 離陸質量

図4は高知から羽田間の①と②における加速度である。この図の加速度が一定に変化しているところは、図2における100秒前後である。この時、速度も収束していることがわかる。加速度の計算範囲を100~110[s]を範囲③として再計算した結果を一緒に表3に示す。

羽田から高知間においては図5から②における加速度は一定に減少しているとみなし、再計算は行わなかった。結果は表4に示す。

Table 4 Takeoff mass (Haneda to Kochi).

Date	Takeoff mass[kg]		
	①+②	①	②
2016.06.10	60150	78150	56150
2016.12.13	57150	78150	46150
2017.04.15	78150	78150	73150
2017.05.27	57150	78150	64150
2017.11.26	61150	78150	55150
2018.06.10	58150	78150	52150

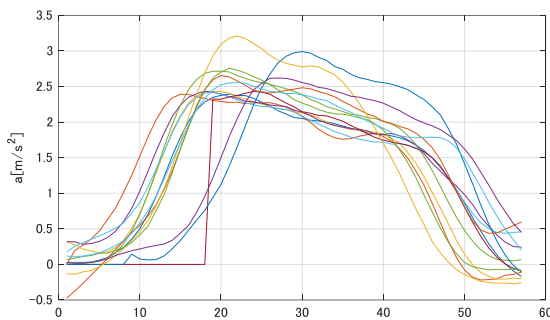


Fig 4 Accel of range ①+② (Kochi to Haneda)

Table 3 Takeoff mass (Kochi to Haneda).

Date	Takeoff mass[kg]			
	①+②	①	②	③
2016.06.08	78150	78150	70150	59150
2016.12.12	78150	78150	78150	61150
2017.02.28	78150	78150	78150	56150
2017.05.26	75150	78150	67150	64150
2017.05.29	76150	78150	64150	52150
2017.11.14	77150	78150	67150	58150
2017.12.01	66150	57150	66150	56150
2018.03.22	70150	78150	53150	43150
2018.06.09	76150	78150	60150	55150
2018.11.13	78150	78150	69150	48150
2018.11.27	78150	78150	55150	48150
2018.12.08	78150	78150	74150	53150
2019.06.06	73150	78150	57150	55150
2017.12.01	78150	57150	66150	56150

計19便の離陸質量を算出して、加速度の計算範囲が大きく影響し離陸質量の算出において重要な値となる。結果から、今後航空機の離陸質量は滑走路内において加速度が減少し始めたところを基準に計算を始めたらいと考える。今回は天候を考慮せず計算していたが、天候によって離陸決心速度や地面摩擦係数、風の影響も変わるので、それらを考慮することでより正確な値を算出できると考えられる。

また、最大推力の値としてBADAモデルの値を用いているが、正確な離陸質量を推定するために、正確な最大推力を推定することも重要であると考え。最大推力を変化させた結果が表5である。これは高知-羽田間の2017年5月29日加速度の範囲②における離陸質量である。この結果から最大推力を正確に推定することも離陸質量を精度よく推定するために重要と考える。

Table 5 Takeoff mass at maximum thrust change

Maximum thrust [N]	Takeoff mass[kg]
166590	73150
156590	68150
146590	64150
136590	59150
126590	54150

6. まとめ

本研究では正確な軌道予測に役立てることを目的とした、航空機の離陸重量を推定する方法を提案した。

初めに解析対象計19便の位置を羽田空港、高知空港の滑走路内で限定し、離陸質量を推定する手順を示した。高知-羽田間の離陸推力を求めるために速度・加速度を求めた。加速度によって離陸質量が変わるため、加速度の計算範囲を変えて計算範囲による推定した離陸質量の精度の検討を行っ

た。速度の線形になっている部分を目視で確認し加速度の計算範囲にすると、BADA モデルから参照される値に近くなったが日によってばらつきが確認された。また、最大推力を変えると離陸質量が大きく変わることが分かった。精度を上げるためには天候を考慮し、加速度の計算範囲の数値的に決め、正確な最大推力を推定することが有効だと考える。

今後の課題として、今回考慮していない気象データを用いて推定結果を検討する必要がある。また、別の路線、別の推定方法で離陸質量の比較を行い、どの推定方法を用いるか検討する。また、5 節の結果から最大推力の推定方法の確立をすることでより精度を上げた離陸質量の推定を目指す。

文献

- (1) 株式会社 日本空港コンサルタンツ, 2018 年度 空港別 緒言及び利用実績, 国内旅客数
URL: http://www.jacinc.jp/db/pdf/2018_airport-activity.pdf
- (2) 国土交通省, 将来の航空交通システムに関する推進協議会, CARATS パンフレット
URL : <http://www.mlit.go.jp/common/001260394.pdf>
- (3) 国土交通省, 将来の航空交通システムに関する推進協議会, CARATS 施策導入計画
URL : <http://www.mlit.go.jp/common/001286416.pdf>
- (4) 福田豊, 日本航空宇宙学会誌, 軌道ベース運用の実現に向けた技術動向, 2012 年 10 号, p371-376
- (5) Junzi Sun, “Modeling and Inferring Aircraft Takeoff Mass from Runway ADS-B Data”, ICRA 2016
- (6) Mair, W. A. and Edwards, B., “A Parametric Study of Take-Off and Landing Distances for High-Lift Aircraft”, 1965.
- (7) 三浦英俊, 緯度経度を用いた 3 つの距離計算方法, (15) 705, 2015 年 12 月号