

머신러닝과 규칙기반 기법을 결합한 순항 구간 추출 알고리즘

이석환*, 류재영, 이학태

인하대학교

An Algorithm for Extracting Cruise Phase Combining Machine Learning and Rule-Based Techniques

Seokhwan Lee*, Jaeyoung Ryu, Hak-Tae Lee

Key Words : Trajectory Data, Cruise Phase, Top of Climb (TOC), Top of Descent (TOD), Clustering

서론

항공 교통량의 증가와 환경적 영향을 고려할 때, 효율적인 항공 교통 관리는 필수적이다. Estimated Time of Arrival의 예측과, 항공기 경로 최적화를 통한 연료 소비 감소 연구^(1~2) 등 많은 연구들이 수행되어 왔으나, 순항 구간을 식별하는 데에는 어려움이 존재한다⁽³⁾.

본 논문은 과거 항적 데이터에서 순항 구간을 추출하기 위해 병합형 계층적 클러스터링과 가우시안 혼합 모델 클러스터링 방법을 사용하여 항적을 클러스터링하고, 규칙기반 기법으로 클러스터 중심의 TOC와 TOD를 추출한다. 이를 이용해 개별 항적의 TOC와 TOD를 추출하여 순항 구간을 추출하는 알고리즘을 제시한다. 추가적으로, 클라우드소싱 방법으로 항적 TOC와 TOD 추출 결과를 교차 검증하고 표본 데이터를 통해 정확도를 추정한다.

본론

1. 데이터 전처리

2022년 김포국제공항에서 제주국제공항으로 향하는 총 48,076 개의 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) 데이터를 사용하였다.

본 연구에서는 선형 보간법을 이용하여 모든 항적 데이터 차원 수를 500개로 동일하게 리샘플링하고, 시간과 고도의 범위를 0과 1사이로 정규화하여 클러스터링 성능을 향상시켰다.

2. 클러스터링

A. Agglomerative Hierarchical Clustering Algorithm

병합형 계층적 클러스터링 알고리즘으로 클러스터 개수 K 를 사전에 정의하지 않고, Ward 연결법으로 클러스터를 병합하여 덴드로그램을 생성하였다. Figure

1은 덴드로그램을 보여주며, 거리 임계 값을 25로 설정함으로써 $K = 45$ 를 도출한 결과를 나타낸다.

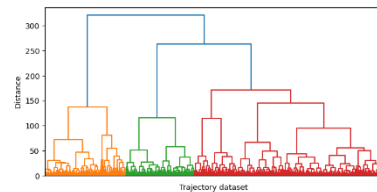


Fig. 1. Dendrogram result.

B. Gaussian Mixture Model Algorithm

가우시안 혼합 모델 알고리즘은 각 가우시안 분포를 평균 $\vec{\mu}_k$, 공분산 Σ_k , 가중치 π_k 로 정의하고, 확률 밀도 함수 $p(\vec{h})$ 를 최대화하는 알고리즘으로, 본 연구에서 Σ_k 는 Full covariance matrix를 사용하였다.

클러스터링 결과 모든 항적은 45개의 클러스터로 분류되었고, Fig. 2는 각 클러스터에 포함된 항적 개수를 보여주고 Cluster 36은 노이즈 클러스터로 3개의 항적이, 나머지 클러스터는 100개 이상의 항적을 포함하고 있다.

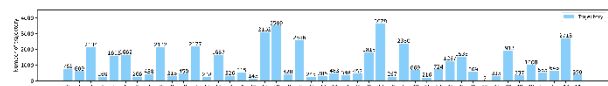


Fig. 2. Distribution of trajectory by clustering.

Figure 3은 분류된 클러스터 중 상위 5개의 항적들과 그 중심 궤적을 보여준다.

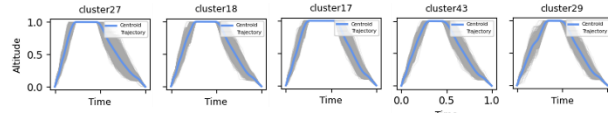


Fig. 3. Clustering results.

C. 클러스터 중심 TOD & TOD 추출

500차원의 고도 데이터를 Ramer-Douglas-Peucker (RDP) 알고리즘을 사용하여 단순화하였다. 이 때,

임계 값 $\epsilon = 0.005$ 로 설정하였다.

정규화되고 단순화된 클러스터 중심의 TOC와 TOD는 최대 고도와 수직 계적의 변화율을 고려한 규칙기반 조건에 따라 추출된다. Figure 4는 클러스터 중심의 TOC와 TOD 추출 결과를 보여준다

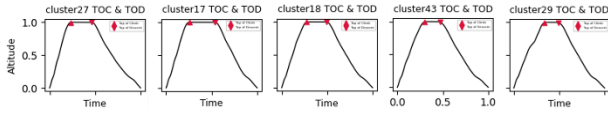


Fig. 4. Centroid's TOC and TOD.

D. 개별 항적 TOC & TOD 추출

RDP 알고리즘을 적용하여 항적 고도 데이터를 $\epsilon = 0.005$ 로 단순화한 후, 규칙기반 기법으로 각 항적의 TOC와 TOD를 추출한다. 먼저, 모든 후보 구간을 데이터의 기울기를 이용해 선별하였다. Figure 5는 클러스터 중심의 TOC와 TOD를 참고해 'Segment TOC', 'Segment TOD'를 식별하는 과정을 보여준다.

Algorithm 1 Find *segment TOC* and *segment TOD* based on Cluster Centroid TOC and TOD

```

1: Input: Cluster centroid TOC ( $TOC_c$ ), Cluster centroid TOD ( $TOD_c$ )
2: Input: List of candidate segment for individual trajectory  $T = \{(start_i, end_i)\}_{i=1}^n$ 
3: Output: Segments segment TOC and segment TOD
4: Initialize segment TOC  $\leftarrow$  None
5: Initialize segment TOD  $\leftarrow$  None
6: for each candidate segment ( $start_i, end_i$ ) in  $T$  do
7:   if  $TOC_c$  is within  $[start_i, end_i]$  then
8:     segment TOC  $\leftarrow (start_i, end_i)$ 
9:   end if
10:  if  $TOD_c$  is within  $[start_i, end_i]$  then
11:    segment TOD  $\leftarrow (start_i, end_i)$ 
12:  end if
13: end for
14: if segment TOC is None then
15:   Set segment TOC as the segment immediately after  $TOC_c$ 
16: end if
17: if segment TOD is None then
18:   Set segment TOD as the segment immediately before  $TOD_c$ 
19: end if
20: return segment TOC, segment TOD

```

Fig. 5. Finding segment TOC & TOD.

최종적으로, 'Segment TOC'의 시작 지점과 'Segment TOD'의 끝 지점을 개별 항적의 TOC와 TOD로 정의한다. Figure 5는 순항 구간이 추출된 개별 항적 예시이다.

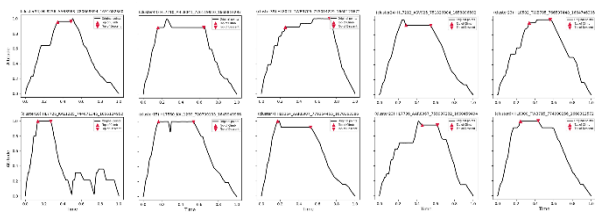


Fig. 5. Individual's TOC & TOD.

결과 및 검증

본 연구에서는 총 48,076개의 항적 중 200개의 샘플을 무작위로 추출한 후, 항공우주공학을 전공한

연구원 3인을 통해 'True', 'Wrong', 'Unclear'로 분류하는 교차 검증을 실시하였다. 그 결과 94.5%의 항적이 'True', 3.0%가 'Unclear', 1.5%가 'Wrong'으로 분류되었으며, 1.0%는 3인의 결과가 일치하지 않아 'NaN'으로 처리되었다. 해당 결과는 Fig. 6에 시각화하였다.

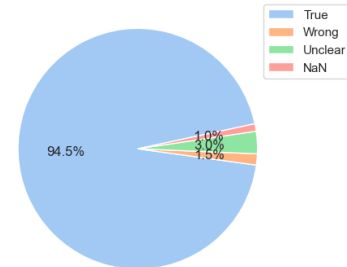


Fig. 6. Validation results.

결론

본 논문에서는 ADS-B 항적 데이터에서 머신러닝과 규칙 기반 기법을 결합하여 보다 정확한 순항 구간을 추출하는 알고리즘을 제시하였다. 또한 클라우드소싱 검증을 통해 정확도를 추정하여 결과를 제시하였다.

향후 알고리즘 고도화를 통해 다양한 운항 노선에도 적용하는 연구를 할 계획이다.

후기

본 연구는 국토교통부의 '빅데이터 기반 항공안전관리 기술개발 및 플랫폼 구축 (RS-2020-KA158275)' 연구의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Benjamin, T. Z. Y., Alam, S., and Ma, C. Y., "A machine learning approach for the prediction of top of descent," 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, 2021, pp. 1-10.
- 2) Dalmau, R., and Prats, X., "Controlled time of arrival windows for already initiated energy-neutral continuous descent operations," Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 85, 2017, pp. 334-347.
- 3) Lee, S., Ryu, J., Park, B.-S., Lee, H.-T., "A Machine Learning-Based Extraction of Cruise Phase From Trajectory Data," AIAA Aviation Forum and ASCEND 2024, 2024, p. 4552.