

大規模フライトデータを対象とした管制指示推薦システム に対する特徴ベクトル集合間類似度計算方式の開発

Development of the Feature Vector Set Similarity Calculation Method
to an Air-Traffic-Control Instruction Recommendation System for Massive Flight Data

祐成 光樹† 宮崎 陽司† 中村 暢達†
Teruki Sukenari Yoji Miyazaki Nobutatsu Nakamura

1. まえがき

近年、航空需要の増大および地方空港の整備進展により就航数が増加し、管制官1人当たりが処理する航空機からの管制要求数(上昇・下降)が増大している。この結果、管制官の業務負荷が増大し、管制官が航空機間の安全な間隔(クリアランス)を確保するための的確な管制指示(承認・否認)を发出できないことによる航空管制の安全性低下が問題視されている[1][2]。我々は、本問題を解決するために、現在の管制要求に対する的確な管制指示を、過去に发出された管制指示の中から検索し、管制官に検索した管制指示を推薦する管制指示推薦システムを開発している。管制官は管制要求发出時に推薦される管制指示を参照して、航空機に发出する管制指示を決定できるため、管制官の業務負荷を軽減できる。

管制官は、空域フライトデータ(管制要求发出時の全航空機の位置・進行方向)が類似する空域で发出された管制要求に対して、同一の管制指示を发出する特徴がある。本特徴を利用して、提案システムでは、現在の空域フライトデータと類似する過去の空域フライトデータをデータベースから検索し、管制官に対して過去空域で发出された管制指示を推薦する。本稿では、管制官の管制指示決定プロセスを説明した後、空域フライトデータ間の類似性を特徴ベクトル集合間類似度と呼ぶ評価値で算出するための「特徴ベクトル集合間類似度計算方式」を示す。そして、実フライトデータに基づく管制指示推薦正解率の評価実験結果を示す。

2. 管制官の管制指示決定プロセス

我々は、管制官が管制指示を決定するまでの処理フローを調査し、図1に示す管制指示決定プロセスを作成した。管制官は管制要求を受信した後、注目機(管制要求の发出元航空機)を中心にして、全周辺機(注目機の近隣を航行する航空機)のフライトデータ(空域フライトデータを構成する各航空機の位置・進行方向)を確認する(Step.1)。そして、(1)注目機の前後方の周辺機、(2)注目機の上昇・下降要求高度の周辺機、(3)注目機に対して接近中の周辺機を重視してクリアランスを確保できるかを分析する(Step.2)。分析の結果、クリアランスを確保可能と判断した場合、管

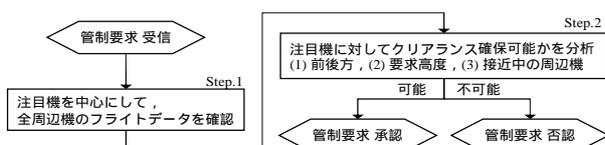


図1: 管制指示決定プロセス

制要求を承認する。

管制指示決定プロセスによれば、管制官は注目機に対する全周辺機の位置・進行方向を分析して管制指示を決定していることが判る。このため、我々は、注目機に対する全周辺機の空域フライトデータが類似する空域で发出された管制要求に対して、管制官は同一の管制指示を发出すると考えた。提案システムでは、空域フライトデータ間の類似性を特徴ベクトル集合間類似度と呼ぶ評価値で計算し、管制官に類似度の高い過去空域で发出された管制指示を推薦する。

3. 特徴ベクトル集合間類似度計算方式

提案方式では、現在および過去の空域フライトデータそれぞれから生成する特徴ベクトル集合 X_a, X_b に対して、(a)特徴ベクトルペア生成処理、(b)特徴ベクトルペア類似度計算処理、(c)重みマッピング処理、(d)特徴ベクトル集合間類似度計算処理を適用して、特徴ベクトル集合間類似度 $S(X_a, X_b)$ を計算する。特徴ベクトルは、航空機 $i(i=0, \dots, n; i=0$ は注目機, $i=1, \dots, n$ は周辺機)の現在位置(緯度 p_{i1} , 経度 p_{i2} , 高度 p_{i3})および進行先位置(緯度 q_{i1} , 経度 q_{i2} , 高度 q_{i3})を用いてベクトル $x_i=(p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, q_{i1}, q_{i2}, q_{i3})$ と記述する。但し、現在位置と進行先位置間の距離が全特徴ベクトルで同一となるように、進行先位置 (q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}) を設定する。特徴ベクトル集合は、全航空機の特徴ベクトルで構成する集合 $X=\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ と記述する。

(a) 特徴ベクトルペア生成処理

本処理により、管制指示決定プロセスの Step.1 を提案方式に反映する。特徴ベクトル集合 X_a, X_b それぞれの注目機の特徴ベクトル $x_{i=0}, x_{j=0}$ の現在位置および進行方向が合致 $(x_{i=0}=x_{j=0})$ するように、全航空機の特徴ベクトルを座標変換する。そして、特徴ベクトル集合 X_a の各周辺機 $i(i \in \{1, \dots, n\})$ の現在位置を基準として、近隣に存在する特徴ベクトル集合 X_b の周辺機 $j(j \in \{1, \dots, m\})$ を抽出する。その後、特徴ベクトル x_i と抽出した特徴ベクトル x_j から成る特徴ベクトルペアを生成する(生成した特徴ベクトルペア数を n_p)。

(b) 特徴ベクトルペア類似度計算処理

処理(a)で生成した特徴ベクトルペアの類似度 $s(x_i, x_j)$ を、「位置の類似度 $s_p(x_i, x_j)$ (式(2))」および「進行方向の類似度 $s_d(x_i, x_j)$ (式(3))」の積として、式(1)で計算する。 $s_p(x_i, x_j)$ は、両周辺機の現在位置が合致した場合、最大値1となる。そして、現在位置間距離の拡大に応じて指数減少する。一方、 $s_d(x_i, x_j)$ は、両周辺機の進行方向が合致した場合、最大値1となる。そして、両周辺機の進行方向が真逆の場合、最小値0となる。

† 日本電気株式会社 サービスプラットフォーム研究所

$$s(x_i, x_j) = s_p(x_i, x_j) \times s_d(x_i, x_j) \quad (1)$$

$$s_p(x_i, x_j) = \exp\left(-\sqrt{\sum_{k=1}^3 (p_{ik} - p_{jk})^2}\right) \quad (2)$$

$$s_d(x_i, x_j) = 0.5 \times \left(1.0 + \frac{\sum_{k=1}^3 (q_{ik} - p_{ik})(q_{jk} - p_{jk})}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 (q_{ik} - p_{ik})^2 \sum_{k=1}^3 (q_{jk} - p_{jk})^2}}\right) \quad (3)$$

(c) 重みマッピング処理

本処理により、管制指示決定プロセスの Step.2 を提案方式に反映する。管制官が重視してクリアランス確保を分析する(1)注目機の前後方の周辺機、(2)注目機の上昇・下降要求高度の周辺機、(3)注目機に対して接近中の周辺機で構成する特徴ベクトルペアの類似度 $s(x_i, x_j)$ が大きくなるように重み係数 W_{ij} を乗算する(式(4))。

$$s(x_i, x_j) = W_{ij} \times s(x_i, x_j) \quad (4)$$

(d) 特徴ベクトル集合間類似度計算処理

本処理では、処理(c)で算出する特徴ベクトルペア類似度 $s_k(x_i, x_j)(k=1, \dots, n_p)$ を用いて特徴ベクトル集合 X_a に対する特徴ベクトル集合 X_b の類似度 $S(X_b|X_a)$ を式(5)で計算する。処理(a)において、特徴ベクトルペアに組み込まれなかった特徴ベクトル集合 X_a の周辺機が多数存在する場合、空域フライトデータの類似性を正確に表現できない。このため、当該周辺機が多数存在する場合の特徴ベクトル集合間類似度 $S(X_b|X_a)$ が小さくなるように、 n_p/n (特徴ベクトルペア生成数 n_p /特徴ベクトル集合 X_a の周辺機数 n) を乗算する。

さらに、処理(a)では、特徴ベクトル集合 X_a の各周辺機(i)の現在位置を基準にして、近隣に存在する特徴ベクトル集合 X_b の周辺機(j)との特徴ベクトルペアを生成している。このため、特徴ベクトル集合 X_a を基準にしたケースと特徴ベクトル集合 X_b を基準にしたケースでは、生成する特徴ベクトルペアは必ずしも一致しない。よって、特徴ベクトル集合 X_b に対する特徴ベクトル集合 X_a の類似度 $S(X_a|X_b)$ を同様に計算し(処理(a), (b), (c))、特徴ベクトル集合間類似度 $S(X_a, X_b)$ を式(6)で計算する。

$$S(X_b | X_a) = \frac{n_p}{n} \times \prod_{k \in n_{pair}} s_k(x_j, x_i) \quad (5)$$

$$S(X_a, X_b) = S(X_b | X_a) \times S(X_a | X_b) \quad (6)$$

4. 評価実験

管制要求・管制指示発出時の実フライトデータを用いて、特徴ベクトル集合 434 件(全セット)を作成した。承認を発出した特徴ベクトル集合は 368 件(承認セット)であり、否認を発出した特徴ベクトル集合は 66 件(否認セット)であった。但し、管制要求として下降を発出した際のフライトデータを入手できなかったため、全セットに関して管制要求は上昇である。

本実験では、全セットから任意の特徴ベクトル集合 1 件(検索集合)を選択し、残りの特徴ベクトル集合 433 件(対象集合)との特徴ベクトル集合間類似度を計算する。そして、類似度が最大となる対象集合の管制指示が、検索集合の管制指示と合致した場合、正解と判定する。本試行を、検索集合を入れ替えながら全セットに対して実行する。

本実験では、提案方式を構成する処理 (b), (c)の有効性を個別評価するために、処理 (b), (c)の組合せが異なる提案方式 4 パターン(表 1(a))に関して正解率(各セットの正解数/各セットの特徴ベクトル集合数)を測定する。さらに、類似度閾値 $S_{th}=0.9$ を設定し、類似度が閾値 S_{th} 以上となる対象集合が存在しない場合、類似する対象集合は存在しないと判断する。

表 1: 実フライトデータを用いた実験結果

(a) 実験パターン					
実験パターン	処理(b) 特徴ベクトルペア類似度計算処理		処理(c) 重みマッピング処理	類似する対象集合が存在しない 検索集合数 [単位 件]	
	位置の類似度	進行方向の類似度			
A					
B				×	
C		×		×	
D	×			×	

: 実験で使用, × : 実験で不使用

(b) 実験パターン毎の実験結果					
実験パターン	正解率 [単位 %]			類似する対象集合が存在しない 検索集合数 [単位 件]	
	全セット	承認セット	否認セット	承認セット	否認セット
A	85	83	93	257	38
B	79	79	82	186	32
C	76	78	64	98	18
D	71	74	57	125	22

全セット434件(承認セット368件, 否認セット66件)

実験の結果(表 1(b))、実験パターン D C B A の順に正解率が向上し、提案方式を構成する全処理から成る実験パターン A の正解率が最も高かった(全セット 85%、承認セット 83%、否認セット 93%)。このことから提案方式で算出する特徴ベクトル集合間類似度が、空域フライトデータ間の類似性を的確に定量化できたと考えられる。

航空管制では、「否認すべき管制要求を承認する False Negative 判定」は、航空管制の安全性低下を招く重大なミスリーディングとなるため、否認セットに対して高正解率(93%)であることは優良な結果と言える。一方、実験パターン A では、類似する対象集合が存在しない検索集合数(検索不能集合数)が 295 件(承認セット 257 件、否認セット 38 件)に増大している。実験パターン A では、位置の類似度、進行方向の類似度、重み係数のいずれかが微小であった場合、他の実験パターン(位置の類似度、進行方向の類似度、重み係数を一部使用)と比較して類似度が低下する。その結果、大部分の対象集合の類似度が類似度閾値を下回り、検索不能集合数が増加したと考えられる。

5. まとめ

本稿では、管制指示推薦システム開発を目的に、空域フライトデータ間の類似度を算出するための特徴ベクトル集合間類似度計算方式を説明した。実フライトデータを用いた実験の結果、管制指示推薦正解率 85%(承認セット 83%、否認セット 93%)を達成した。今後は、特徴ベクトル集合の実験サンプル数を増強することで、正解率を劣化させることなく検索不能集合数を低減可能か検証する。さらに、推薦システムの実用化に向けて上昇以外の管制指示(下降、速度変更等)に対する正解率を評価する。

参考文献

[1] 長岡栄, “航空交通管理に向けて ~ 航法・航空管制システムにおけるパラダイム変化 ~”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.108, No.169, pp.19-22, 2008.
 [2] 三垣充彦ほか, “将来の航空交通管理システムの見通し”, 電子航法研究所 第 7 回研究発表会, 2007.