航空交通管理における意味的な相互運用性のための のオントロジーの構築と応用

An Ontology-based Approach for Semantic Interoperability in Air Traffic Information Management

江上 周作^{*1}
Shusaku Egami

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所
Electronic Navigation Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, Japan
s-egami@mpat.go.jp

呂 曉東
Xiaodong Lu

(同 上)

古賀 禎
Tadashi Koga

(同 上)

住谷 泰人
Yasuto Sumiya

(同 上)

keywords: ontology, semantic interoperability, knowledge graph, system wide information management, air traffic management

Summary

With the advancement of information and communication technologies, to improve the interoperability between heterogeneous information systems by regularizing the syntax for information exchange is essential to achieve global seamless air traffic management operation. However, the current point-to-point aviation related information exchange among different systems and operators cannot satisfy the requirement for interoperability. The concept of System Wide Information Management (SWIM) has been promoted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) to implement interoperability and harmonization in a global operation. In the SWIM environment, all the related stakeholders need to efficiently obtain the necessary ATM data with situational awareness from various information domains. However, this is difficult to realize in the current system, as different data are structured based on different data models. In this study, we construct domain ontologies based on flight, aeronautical, and weather information exchange models. Moreover, for semantic interoperability in the SWIM environment, we develop an upper ontology-based reference ontology that enables common situational awareness of spatiotemporal concepts. Furthermore, we propose a methodology for mapping heterogeneous domain ontologies to the reference ontology with the manual refinement. Finally, we apply the proposed ontologies to a SWIM test system. The applicability and scalability of the proposed ontologies are demonstrated through a case study in the SWIM environment.

1. はじめに

現行の航空交通管理 (Air Traffic Management: ATM) では、航空機の運航に関わる飛行計画、空港、監視、航空気象、制限空域などの様々な情報について、独立したシステムを使用して各情報の提供者と利用者の間の 1 対 1 の情報交換を行っている。一部の二国間での情報交換を除き、ATM 関連情報は構造化されていない短いテキストメッセージとして国際航空固定通信網 (Aeronautical Fixed Telecommunication Network: AFTN) を経由して交換されている。これに対し、グローバルに整備された IP ネットワークを基盤として、独立したシステムを連携させてあらゆる ATM 関連データについて多対多のシ-

ムレスな情報配信を可能にする System Wide Information Management (SWIM)[ICAO 15] のコンセプトが、国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization: ICAO) によって推進されている。SWIM 環境では ATM 関連情報を Extensible Markup Language (XML) 形式の標準フォーマットで交換するため、World Wide Web における Web サービスのように多種多量の情報をシステム間で共有して自動的に処理できるようになる。なお、SWIM の実用化に向けてすでに実証実験が行われており [Lu 19], 2025 年以降に各国で順次導入することが検討されている。

現在、SWIM 環境で共有される運航情報、航空情報、気象情報に対して 3 つの異なる情報交換モデルが XML スキーマとして開発されている。これらの情報交換モデ

^{*1} 現所属：国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター, s-egami@aist.go.jp

ルは異なる組織で開発されており、語彙、カバレッジ、粒度、視点などが不均一であるため、システムの意味的な相互運用性 (Semantic Interoperability) の面で課題がある。また、ICAO でも意味的な相互運用性のためにセマンティック Web 標準技術の使用が検討され始めている [ICAO 15]。そこで本研究では、SWIM の意味的な相互運用性を高めることを目的とする。具体的には、

- (1) 異種情報間の横断的な検索
- (2) システム間で時空間的な概念レベルの共通認識
- (3) モデルとしての拡張性と検索範囲の拡張性の向上

の3つの課題の解決を目的とする。これにより期待される効果としては、SWIM 利用者が必要な情報やその関連情報を横断的に検索することや、情報更新時における影響伝搬を考慮した飛行計画、飛行中の経路変更の効率化などが考えられる。

異なる情報間の意味的な相互運用性の実現のためには、対象領域の概念および概念間の関係を形式化するオントロジーの利用が適している。これまで機能・不具合知識の共有 [来村 08, 小路 07]、生物規範工学 [古崎 16]、遺伝学 [梶屋 14] など、様々な分野で相互運用性のために応用されてきた。そこで、本研究では各情報交換モデルに基づくドメインオントロジーを構築・公開し、これに基づいて各情報をセマンティック Web 技術を用いて知識グラフ (ナレッジグラフ) 化することで、異種情報間の横断的な検索を可能にする。

さらに、SWIM においては各情報の時間的情報 (瞬間・間隔)、空間的情報 (三次元、二次元、一次元、零次元) を区別してシステムが共通認識を持つことが重要となる。すなわち、異種情報間の影響の可能性がある場合、それがどの次元で影響するのか認識できる必要がある。また、SWIM 環境においては今後共有される情報が追加される可能性があり、新たな情報交換モデルが開発された際に、その情報との連携ができる拡張性を持つオントロジーが望ましい。そこで、本研究では上位オントロジーの一つである Basic Formal Ontology (BFO) [Smith 05] に基づいて、航空交通情報交換モデルの参照オントロジー (SWIMONTO) を新たに構築し公開する。特に時間・空間の各次元の概念を明確に区別し、異種情報間で共通の認識を持つことができるような設計としている。また、設計における視点や粒度の違いから生じるドメインオントロジーの不均一な構造を洗練し、参照オントロジーへマッピングする手法を提案する。これにより、ナレッジグラフの構造上の連結を頼りに横断的な検索を行うだけでなく、異種情報間で時空間的な概念レベルで共通認識を持った横断的な検索を可能にする。さらに、今後新たな情報交換モデルの追加にも対応できる拡張性を実現する。

最後に、構築したオントロジーを SWIM テストシステムに導入した応用例を示し、応用の観点からオントロジーを評価し考察するとともに実用性についても考察する。

図 1 SWIM レイヤ [ICAO 15]

以降、本稿では 2 章で関連技術および関連研究について述べ、3 章で SWIM で交換される情報交換モデルのドメインオントロジーの構築について述べる。4 章で SWIMONTO の構築とドメインオントロジーのマッピング手法について述べる。5 章でオントロジーの SWIM テストシステムへの応用について述べ、6 章で評価と考察を述べる。最後に 7 章でむすびとする。

2. 関連研究

2.1 SWIM と情報交換モデル

現在 ICAO が提示している SWIM のレイヤ構成 [ICAO 15] は図 1 の通りであり、情報交換のために標準化されたモデルを用いる。具体的には、運航情報に関しては、Flight Information Exchange Model (FIXM)*¹が使用される。航空情報サービスにより配信される空港、制限空域、航空支援施設などを含む航空情報に関しては Aeronautical Information Exchange Model (AIXM)*²が使用される。定時航空実況気象通報式 (METAR)、運航用飛行場予報気象通報式 (TAF) や特別気象情報 (SIGMET) などの気象情報に関しては、ICAO Meteorological Information Exchange Model (IWXXM) [ICAO 14] が使用される。これらの情報交換モデルは XML スキーマで定義されており、XML 形式のデータがサービス間で交換される。さらに、ATM 関連の参照語彙として ATM Information Reference Model (AIRM)*³が定義されている。AIRM は共通語彙の位置付けであり、それ以上のセマンティクスを持たない。

2.2 航空交通におけるセマンティック Web 技術の応用

SWIM の情報交換レイヤにおいては意味的な相互運用性も検討されている。実現のための標準技術候補として Resource Description Framework (RDF) や Web Ontology Language (OWL)*⁴などが検討されるなど [ICAO 15]、航空交通分野においてもセマンティック Web 技術による意味的な相互運用性の実現が求められている。

*1 <https://www.fixm.aero/>

*2 <http://aixm.aero/>

*3 <http://airm.aero/>

*4 <https://www.w3.org/OWL/>

関連研究として、Single European Sky ATM Research (SESAR) プロジェクトの1つである BEST プロジェクト^{*5}は、SWIM の効力を最大限に引き出すために、オントロジーや推論などのセマンティック技術を活用した研究を行っている[?, Neumayr 17]. BEST プロジェクトでは標準フォーマットの OWL 化、情報をコンテナ化してメタデータを付与する Semantic Container の定義、Semantic Container の推論実験などを行っており、SWIM におけるセマンティック技術の有効性を示している。BEST プロジェクトでは AIRM と AIXM を対象に XSL Transformations (XSLT) により OWL に変換し、IWXXM に関しては TAF と METAR のみを対象に手動で OWL 化している。しかし、これらの OWL オントロジーはデータタイプやクラス・プロパティ制約の記述が不足しており、また、AIXM の Event 拡張^{*6}や FIXM については対象外であった。そこで、本研究では新たに FIXM, AIXM, IWXXM をもとに各ドメインオントロジーを構築する。

一方で、米国連邦航空局 (Federal Aviation Administration: FAA) はセマンティック Web 技術を使用して開発された成果を公開するための語彙 semantics.aero^{*7}を提供している。これは SWIM 環境で使用される基本的な語彙やタクソノミーを SKOS[Miles 05] を用いて記述したものである。また、FAA は Service Oriented Architecture (SOA) に基づく SWIM のサービス間連携に向けた、Web Service Description Ontological Model (WSDOM) を定義している^{*8}。WSDOM はサービスに関する主要な概念をカバーしており、セマンティック Web サービス記述オントロジーの OWL-S^{*9}で記述されている[Keller 16]。さらに、WSDOM を拡張した地理空間情報のサポートに向けた議論^{*10}が行われたが、FIXM, AIXM, IWXXM との連携についての議論は進んでいない。

また、NASA および FAA は ATM のためのオントロジーとして atmonto[Keller 17] を提案し、専門的な情報アクセスと分析のニーズがある ATM コミュニティ向けに、atmonto に基づいて大規模なナレッジグラフ ATMGRAPH を構築している[Keller 19]。さらに、AIRM の OWL と atmonto のオントロジーマッピングも試みられている[?]. このように、欧米を中心にセマンティック Web 技術の航空交通分野への応用が始まっている。しかし、現在 SWIM で採用する FIXM, AIXM, IWXXM の正式な仕様が確定しておらず、各モデルの開発の進捗状況が異なっていることから、3つの情報交換モデルの全てを対象とした意味的な相互運用性やモデルとしての拡張性、検索範囲の拡張性を考慮したオントロジーの研究は進んでいない。

本研究ではこれらの課題に新たに取り組む。

2.3 オントロジーマッピング

異なるオントロジーの連携に向けて、オントロジー間の対応関係を記述するオントロジーマッピングの研究が行われている。オントロジーマッピングは、(1) グローバルなオントロジーとローカルなオントロジー間のマッピング、(2) ローカルなオントロジー間のマッピング、(3) オントロジーのマージとアラインメントに関するマッピングの3種類に分類できる[?]. SWIM 環境においては、今後共有される情報の種類が増えることが予想されるため、その都度各ローカル (ドメイン) オントロジーとの対応関係を記述するのは時間的・労力的コストがかかる。したがって、より拡張性のあるグローバルな参照オントロジーを設計し、各ドメインオントロジーを参照オントロジーにマッピングする (1) の方針が適していると考えられる。そこで、本研究では参照オントロジーとして SWIMONTO を設計し、各ドメインオントロジーから SWIMONTO へのマッピング手法を提案する。

3. 航空交通ドメインオントロジーの構築

既存の AIXM の OWL オントロジー (AIXM-O), I WXXM の OWL オントロジー (IWXXM-O) はデータタイプやクラス・プロパティ制約が不十分であり、また、FIXM の OWL オントロジー (FIXM-O) は存在しない。そこで、FIXM, AIXM, IWXXM の XML スキーマに基づいて、新たに OWL 形式のオントロジーを構築する。XML スキーマは OWL に比べて表現の自由度が高いため等価な変換は困難であり、様々な変換手法が提案されている[Hachrouf 15]。本研究では 40 個のパターンを用いて XML スキーマから OWL への変換を行う Janus[Bedini 11] に基づく変換プログラムを作成し、FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O を自動的に構築した。図 2 に FIXM-O のクラス図の一部を示す。矢印はクラスが持つプロパティ制約を意味している。Message クラスにはフライト情報として Flight クラスが関連付けられている。Flight クラスには提出された飛行経路の軌道情報として RouteTrajectory クラスが関連付けられており、FlightRouteElement クラスは軌道内の通過点を表す。この通過点の四次元情報として TrajectoryPoint4D クラスが関連付けられている。TrajectoryPoint4D は緯度経度情報として Position クラスを、高度情報として FlightLevelOrAltitude クラスを、時間情報として Point4DTimeChoice クラスを持つ。

図 3 に AIXM-O のクラス図の一部を示す。AIXMBasicMessage クラスは BasicMessageMemberAIXM クラスを持ち、そのサブクラスとして空域情報を表す Airspace クラスが定義されている。空域の地理空間情報として空域容量を表す AirspaceVolume クラスが存在し、水平形状情報として Surface クラスが関連付けられている。Surface

*5 <https://project-best.eu/>

*6 https://ext.eurocontrol.int/aixm_confluence/display/DNOTAM/The+Event+Concept

*7 <https://semantics.aero/>

*8 https://www.faa.gov/air_traffic/technology/swim/governance/service_semantics/

*9 <https://www.w3.org/Submission/OWL-S/>

*10 <http://docs.opengeospatial.org/per/16-039.html>

図2 FIXM-O のクラス図の一部

図3 AIXM-O のクラス図の一部

クラスは GeoSPARQL Ontology の asWKT プロパティを持ち、その値が全て、ジオメトリオブジェクトを地図上に表現する Well-known text (WKT) であると定義している。例えば、WKT では空域容量の水平形状のポリゴンは緯度経度を使用して次のように記述される。

```
POLYGON((131.83 30.17, 135.83 34.17, 138.83
34.67, 133.83 30.33, 131.83 30.17))
```

このように定義することで、空域容量が水平形状情報を持つ場合にその値が WKT に準拠していることが保証され、検索時にジオメトリ演算を使用した空域判定が可能になる。これは BEST プロジェクトによる既存の AIXM-O においては不十分な部分であった。さらに、既存の AIXM-O では AIXM Event スキーマ^{*11}については OWL 化しておらず、Notice To Airmen (NOTAM) のイベントの定義が不足していた。NOTAM とは航空関係施設、業務、方式、および危険などに係る設定、状態または変更等に関する情報である [国土 19]。本研究では AIXM Event スキーマも OWL 化の対象としている。これにより、受信している NOTAM メッセージのキャンセルと修正情報の反映も可能になる。

図4に IWXXM-O のクラス図の一部を示す。IWXXM-O では火山噴火、熱帯低気圧、乱気流などの特別気象情報 (SIGMET)、定時飛行場実況気象通報式 (METAR および SPECI)、飛行場予報 (TAF) の各レポートは Report クラスのサブクラスとして定義されている。特に SIGMET に関しては既存の IWXXM-O では対象としておらず、本研究で新たに OWL 化している。観測情報として Observation クラスが関連付けられており、さらに EvolvingMeteorologicalCondition クラスが四次元的な情報を持つ。地理空間的な情報としては AIXM-O の AirspaceVolume クラスと関連付けられている。

構築した FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O の規模を表

図4 IWXXM-O のクラス図の一部

表1 構築したドメインオントロジーの規模

	FIXM-O	AIXM-O	IWXXM-O
Class	127	572	65
Object Property	278	268	72
Data Property	184	567	16
Axiom	3,369	13,979	915

1 に示す。また、構築した OWL 形式のオントロジーを VOWL [Lohmann 16] で可視化した全体像を図5に示す。IWXXM では空域に関する記述に AIXM の AirspaceVolume クラスを使用しているため、IWXXM-O と AIXM-O は一部接続しているが、FIXM-O は独立して存在していることがわかる。

4. 参照オントロジーの構築とドメインオントロジーのマッピング

既存のドメインオントロジーがない環境においては、意味的な相互運用性の実現に向けて [Elmhahbi 19] や [Karray 19] のように、上位オントロジー、中位オントロジー、ドメインオントロジー、サブドメインオントロジーとトップダウンにドメインオントロジーを設計していくことが望ましい。そこで、本研究でも上位オントロジーに基づいて中位オントロジー (参照オントロジー) として SWIMONTO を設計する。しかし、ドメインオントロジーについては中位・上位のオントロジーを参照して一から設計するのではなく、レガシーなシステムとの互換性を考慮して、先行して存在している各情報交換モデルに基づいている。したがって、各情報交換モデルの粒度、カバレッジ、設計における視点の差異により、ドメインオントロジーから SWIMONTO へのマッピングが困難な場合がある。そこで、本研究では設計した SWIMONTO に基づいて各ドメインオントロジーを洗練しながらマッピングする。

4.1 SWIMONTO の設計

今後の ATM では、緯度、経度、高度の三次元位置情報に時間を加えた四次元軌道 (4D Trajectory: 4DT) で運航を管理する、軌道ベース運用 (Trajectory-Based Operation: TBO) へ移行することを目指している [ICAO 05]。そのため、SWIM 環境で交換される時間的情報 (間隔、瞬間) と空間的情報 (三次元、二次元、一次元、零次元)

^{*11} <http://aixm.aero/schema/5.1/event/index.html>

図5 構築したドメインオントロジーの全体像

図6 本研究におけるオントロジーの全体イメージ

を区別してシステムが共通認識を持つことが必要であり、これらの概念記述の粒度を均一化するオントロジーが求められる。また、今後 SWIM 環境で共有される情報の種類が増加することを考慮すると、標準化の議論が進んでいるオントロジーを参照することが、他のモデルとの連携可能性を高めることに繋がる。そこで、本研究では時間と空間の概念記述が TBO の考えに適しており、現時点で ISO 標準になりつつあり^{*12}様々な分野で利用されている BFO を、SWIMONTO が参照する上位オントロジーとして選択した。また、米国情報高等研究開発活動 (Intelligence Advanced Research Projects Activity: IARPA) の Knowledge Discovery and Dissemination (KDD) プログラムで開発が進められてきた、BFO 準拠の中位オントロジーである Common Core Ontologies (CCO)[Rudnicki 17] も様々な分野で応用されている。そこで、本研究では BFO および CCO を参照し、CCO を拡張する形で SWIMONTO を設計した。したがって、本研究におけるオントロジーの全体イメージは図6の通りである。

図7に SWIMONTO のクラス関係図の一部を示す。三角矢印は is-a 関係を、矢印はクラスにおけるプロパティの制約条件を意味している。例えば、三次元空間 (柱体) を意味するクラスは次の記述論理式 (1) の通りに定義さ

れる。

ThreeDimensionalSpace

$\sqsubseteq$ (*ThreeDimensionalSpatialRegion*

$\sqcap \exists$ *has_spatial_part*

.TwoDimensionalSpatialRegion

$\sqcap \exists$ *hasAltitude.VerticalRange*) (1)

式 (1) は *ThreeDimensionalSpace* クラスが *ThreeDimensionalSpatialRegion* クラスのサブクラスであること、そして *ThreeDimensionalSpace* クラスのインスタンスが持つ *has_spatial_part* プロパティの値のうち少なくとも1つが *TwoDimensionalSpatialRegion* のインスタンスであること、さらに *hasAltitude* プロパティの値のうち少なくとも1つが *VerticalRange* クラスのインスタンスであることを定義している。SWIMONTO では BFO および CCO で定義されている空間領域、時間領域に関するクラスを可能な限り参照しつつ、必要に応じてクラスとプロパティを追加している。BFO および CCO は制約条件の記述が少なく再利用における自由度が高いことが利点であるが、その自由度の高さ故にドメインオントロジーのマッピング指針を統一することが難しい。そこで、SWIMONTO ではクラスにおけるプロパティ制約条件も追加している。構築した SWIMONTO およびドメインオントロジーを我々の Web サイトで公開している^{*13}。

4.2 SWIMONTO に基づくドメインオントロジーの洗練とマッピング手法

本研究で行うドメインオントロジーから SWIMONTO へのマッピングとは、ドメインオントロジー $O^d = \{C^d, P^d\}$ におけるあるクラス $\exists c^d \in C^d$ 、あるプロパティ $\exists p^d \in P^d$ と SWIMONTO $O^s = \{C^s, P^s\}$ におけるあるクラス $\exists c^s \in C^s$ 、あるプロパティ $\exists p^s \in P^s$ の間で、 $c^d \sqsubseteq c^s$ および $p^d \sqsubseteq p^s$ の関係を定義することである。

まず、クラスおよびプロパティの制約条件、クラス名やコメント (用途や説明文) を参考にクラス間のマッピングを行う。例えば、AIXM-O と SWIMONTO のマッピングにおいて

Surface $\sqsubseteq$ *TwoDimensionalSpatialRegion* (2)

の関係が定義できる。これは、*Surface* は *TwoDimensionalSpatialRegion* のサブクラスであることを意味している。また、*AirspaceVolume* クラスの制約条件は式 (3) の通りである。

AirspaceVolume

$\equiv$ ($\exists$ *horizontalProjection.Surface*

$\sqcap \exists$ *upperLimit.ValDistanceVertical*

$\sqcap \exists$ *lowerLimit.ValDistanceVertical*) (3)

これは「*AirspaceVolume* は水平面の写像として *Surface*

*12 <https://www.iso.org/standard/74572.html>

*13 <https://www.enri.go.jp/luxd/ontology/>

図 7 SWIMONTO のクラス関係図

(表面)を持ち、鉛直方向の上限値と下限値を持つ」という制約を意味している。ここで、鉛直方向の上限値と下限値を持つことは、鉛直方向の範囲を持つことと同等であると考えられる。そして、前述の式 1 は「ThreeDimensionalSpace (三次元空間 (柱体)) は TwoDimensionalSpatialRegion (二次元空間領域) と VerticalRange (鉛直方向の範囲) を持つ」という制約を意味している。したがって、式 (1)~(3) より、式 (1) の制約条件をより具体化したものが式 (3) の制約条件であると判断することができ、この判断をもとに式 (4) と式 (5) を定義する。

$$\text{AirspaceVolume} \sqsubseteq \text{ThreeDimensionalSpace} \quad (4)$$

$$\text{horizontalProjection} \sqsubseteq \text{has_spatial_part} \quad (5)$$

ここで、ドメインオントロジー間で構造が不均一である問題により、ドメインオントロジーによっては部分的に SWIMONTO へマッピングできないことがある。そこで、次の 2 つの方針でドメインオントロジーを洗練することにより解決する。

- (1) 中間クラスおよび中間プロパティの作成
- (2) 推論プロパティの作成

§1 中間クラスおよび中間プロパティの作成

例えば、FIXM-O においてフライトプランのトラジェクトリにおける航空機通過点は、TrajectoryPoint4D クラスとして次のように定義されている。

$$\begin{aligned} \text{TrajectoryPoint4D} &\equiv (\exists \text{ level.FlightLevelOrAltitude} \\ &\sqcap \exists \text{ pos.Thing} \\ &\sqcap \exists \text{ time.Point4DTimeChoice}) \quad (6) \end{aligned}$$

level プロパティは高度を、pos プロパティは緯度経度の値を、time は航空機の通過時刻を意味している。このよ

うに、TrajectoryPoint4D クラスは緯度経度、高度、時刻の値を直接持つ構造となっている。したがって、三次元空間的な点や地表点を意味するクラスが存在せず、ThreeDimensionalPath クラスや GroundTrack クラスへのマッピングはできない。このように中間クラスが不足している場合には、新たに中間クラスとそれに付随する中間プロパティを作成する。FIXM-O においては、緯度経度を持つ地表点のジオメトリクラスとして TrajectoryPoint0D クラスを、地表点と高度のみを持つ中間クラスとして TrajectoryPoint3D クラスを作成する。また、これらのクラスに接続するための中間プロパティとして hasPoint0D, hasPoint3D プロパティを作成する。同時に、TrajectoryPoint0D, TrajectoryPoint3D, TrajectoryPoint4D を次のように再定義する。

$$\begin{aligned} \text{TrajectoryPoint3D} &\equiv (\exists \text{ level.FlightLevelOrAltitude} \\ &\sqcap \exists \text{ hasPoint0D.TrajectoryPoint0D}) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TrajectoryPoint4D} &\equiv (\exists \text{ hasPoint3D.TrajectoryPoint3D} \\ &\sqcap \exists \text{ time.Point4DTimeChoice}) \quad (8) \end{aligned}$$

この洗練により、新たに次のマッピングを定義することができる。

$$\text{TrajectoryPoint4D} \sqsubseteq \text{Process} \quad (9)$$

$$\text{TrajectoryPoint3D} \sqsubseteq \text{ThreeDimensionalPosition} \quad (10)$$

$$\text{TrajectoryPoint0D} \sqsubseteq \text{GroundTrackPoint} \quad (11)$$

$$\text{hasPoint0D} \sqsubseteq \text{has_spatial_part} \quad (12)$$

$$\text{hasPoint3D} \sqsubseteq \text{occurs_at} \quad (13)$$

§2 推論プロパティの作成

例えば, AIXM-O において Airspace クラスから Process クラスへのマッピングが考えられるが, Airspace クラスは時間的領域や空間的領域を意味するクラスとの直接的な関係が定義されておらず, 図7の Process クラスの制約条件 (R1,R2) によりマッピングはできない. 具体的には, Airspace クラスと三次元空間領域の AirspaceVolume クラスとの関係は, $\text{Airspace} \xrightarrow{\text{geometryComponent}} \text{AirspaceGeometryComponent} \xrightarrow{\text{theAirspaceVolume}} \text{AirspaceVolume}$ のように間接的であり, 対して SWIMONTO の Process クラスでは $\text{Process} \xrightarrow{\text{occurs_at}} \text{SpatialRegion}$ と直接的な関係である. 同様に, 時間的領域を意味する TemporalEntity クラスとの関係も, $\text{Airspace} \xrightarrow{\text{timeSlice}} \text{AirspaceTimeSlice} \xrightarrow{\text{validTime}} \text{TemporalEntity}$ のように間接的である. つまり, AIXM-O において $p^d \sqsubseteq \{\text{occurs_on}, \text{occurs_at}\}$ となる p^d が存在せず, プロパティに関してもマッピングができない. このように中間クラスが多く, プロパティパス数の相違によりマッピングができない場合は, プロパティパス数を揃えるように推論プロパティを作成することで解決する. ここで, 推論プロパティとは関係を明示的に記述するプロパティではなく, 推論エンジンによる推論時に生成されることになる, 暗黙的な関係記述を行うプロパティである. 本研究では OWL Property Chain 公理^{*14}を使用して推論プロパティを定義する. 上述の例では式(14)(15)のように推論プロパティ $\text{timeSlice_ValidTime}$, $\text{geometryComponent_theAirspaceVolume}$ を定義し, これにより式(16)(17)(18)のようにマッピングできる.

$$\begin{aligned} \text{timeSlice} \circ \text{validTime} \\ \equiv \text{timeSlice_ValidTime} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{geometryComponent} \circ \text{theAirspaceVolume} \\ \equiv \text{geometryComponent_theAirspaceVolume} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{timeSlice_ValidTime} \sqsubseteq \text{occurs_on} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{geometryComponent_theAirspaceVolume} \\ \sqsubseteq \text{occurs_at} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{Airspace} \sqsubseteq \text{Process} \quad (18)$$

5. SWIM におけるオントロジーの応用

本章では, 前章までに構築したオントロジーを SWIM テストシステムに応用した例について述べる.

5.1 SWIM テストシステムの構成

これまでに SWIM テストシステムが構築され, シナリオベースの検証実験が行われている [Lu 19]. 本研究では図8に示すシステム概要図の通りに SWIM テストシステムを拡張した. SWIM テストシステムでは, 航空機の運航に係る情報を外部サービスまたは監視システムより取得し, 各種情報交換モデルに基づいて変換する. 変換され

図8 拡張した SWIM テストシステムの概要図

表2 生成した RDF データ量

データの種類	トリプル数
FIXM	5,972
AIXM	15,066
IWXXM	5,009
補完した関係	40,573
合計	66,620

たデータを Messaging Infrastructure により各システムやユーザに配信する. Messaging Infrastructure は Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) による Publish/Subscribe や Representational State Transfer (REST) による Request/Reply を利用して, システム間の情報交換を実現する. 配信されたデータを Resource Description Framework (RDF) 生成器がオントロジーに基づいて RDF 化し, RDF トリプルストアに格納する.

本研究では 2019 年 5 月 29 日から 6 月 24 日の約一ヶ月間, 国内における NOTAM と SIGMET のデータを収集し, 計 20,075 トリプルの RDF を生成し RDF ストアに蓄積した. なお, NOTAM は緯度経度情報が取得できる制限空域に関するデータ (Special Activity Airspace: SAA) を対象とした. また, 運航情報に関しては取得が困難であるため, 日本の国内線および国際線 9 便の模擬の FIXM シナリオデータを基に 5,972 トリプルの RDF を生成し, RDF トリプルストアに格納した. 生成した RDF データ量を表2に示す. 補完した関係は, 5.2 節で説明する手法により補完されるトリプルである.

5.2 異種情報間の関係補完

蓄積した RDF データについて, 位相的な時間関係を CCO のプロパティを使用して補完し, ジオメトリ間の空間的关系を GeoSPARQL Ontology[Battle 12] のプロパティを使用して補完する, 異種情報間の関連付けの手法について述べる. これらの定性的な関係を追加することで検索時の利便性が向上し, 定性時空間推論の応用も可能になる.

図 9 位相的な時間関係 (Allen's Temporal Relations)

図 10 ジオメトリ間の空間的關係 (RCC8)

§1 位相的な時間関係の補完

CCO における Time Ontology モジュールにおいて位相的な時間関係は Allen らの定義 [Allen 83] (図 9) による Before, Meets, Overlaps などの 13 種類の関係に, Disjoint 関係を加えた 14 種類のプロパティが用意されている. 例えば次の SPARQL クエリを使用して位相的な時間関係を補完することが可能である.

```
CONSTRUCT { ?time1 cco:interval_overlaps ?time2 .
} WHERE {
  ?time1 time:hasBeginning/time:inXSDDateTime ?
    time1Begin ;
    time:hasEnd/time:inXSDDateTime ?time1End .
  ?time2 time:hasBeginning/time:inXSDDateTime ?
    time2Begin ;
    time:hasEnd/time:inXSDDateTime ?time2End .
  FILTER(?time1 != ?time2)
  FILTER((?time1Begin < ?time2Begin) && (?
    time1End < ?time2End) && (?time2Begin < ?
    time1End)) }
```

これは時間間隔リソース time1 が別の時間間隔リソース time2 と重複する間隔がある場合に, time1 と time2 を cco:interval_overlaps プロパティで関連付けしたトリプルを生成するというルールに相当する. 本研究ではデータ数が膨大することを防ぐため, Disjoint, Before, After 関係については関係補完の対象としない. また, Time Ontology では位相的な時間関係のプロパティについて逆関係 (owl:inverseOf) を定義しているため, 一方の関連付けを行うとその逆関係が OWL 推論により補完される. したがって, 本研究では Meets, Overlaps, Starts, Contains, Finishes, Equals の 6 種類の位相的な時間関係と, 時間間隔と瞬間の関係 (cco:has_inside_instant) を補完するルールを定義し, このルールに相当する SPARQL クエリを実行した.

§2 ジオメトリ間の空間的關係の補完

定性空間表現と推論には, 2つの空間的領域間における 8通りの基本関係を定義した Region Connection Calculus である RCC8 (図 10) が用いられることが多い. RCC8 に基づいた OWL オントロジーの SOWL[Batsakis 11] は定性空間的表現と推論を可能にする. GeoSPARQL Ontology は RCC8 に対応する 8通りの関係に, 交差 ($\neg DC$) を意味する intersects を加えた 9通りの空間的關係を定義している. 本研究では空間的領域間だけでなく, 領域と線, 領域と点などの関係も考慮するため, GeoSPARQL Ontology を使用する. 本研究で使用する RDF トリプルストアの Ontotext GraphDB は GeoSPARQL のジオメトリ検索に対応しているため, 例えば次の SPARQL クエリを使用して空間的關係を補完することが可能である.

```
PREFIX bfo: <http://purl.obolibrary.org/obo/BFO>
CONSTRUCT { ?surface geo:sfContains ?point . }
WHERE {
  ?surface a bfo:_00000009 ; geo:asWKT ?surWKT .
  ?point a bfo:_00000018 ; geo:asWKT ?pointWKT .
  filter (geof:sfContains(?surWKT, ?pointWKT)) }
```

これは, ある二次元空間領域のリソース surface がある零次元空間領域 point を含む場合, surface と point を geo:sfContains プロパティで関連付けしたトリプルを生成するという汎用的なルールに相当する. 特に本研究の場合では, ある空域容量の水平方向の投影情報リソース surface が, 飛行経路の通過点における地表点リソース point を空間的に含むことに相当する. このようなクエリにより他の空間的關係についても補完した.

また, 航空交通においては平面的な関係だけでなく, 高度を追加した三次元の関係を考える必要がある. SOWL や GeoSPARQL などの既存のオントロジーは平面的な関係しか考慮していないため, 三次元的な関係を記述することはできない. そこで, 三次元の包含関係を意味する contains プロパティを SWIMONTO で定義し, 次の SPARQL クエリを使用して三次元の包含関係を補完した.

```
PREFIX so: <https://www.enri.go.jp/~s-egami/
ontology/swimonto.owl#>
CONSTRUCT { ?asv so:contains ?point3D . }
WHERE {
  ?asv af:horizontalProjection ?surface ;
    af:hasVerticalRange ?vr .
  ?vr af:hasUpperLimitPoint/af:altitude ?ul .
  ?surface geo:asWKT ?surWKT .
  ?point3D a fl:TrajectoryPoint3D ;
    fl:level/fb:flightLevel ?fl ;
    fl:hasPoint0D/geo:asWKT ?pointWKT .
  BIND(xsd:decimal(str(?fl)) AS ?flval)
  optional {
    ?vr af:hasLowerLimitPoint/af:altitude ?ll .
    BIND(xsd:decimal(str(?ll)) AS ?llval)
    filter(?llval < ?flval)
  }
  BIND(xsd:decimal(str(?ul)) AS ?ulval)
  filter(?flval <= ?ulval) }
```

図 11 フライトプランのシナリオ (RJSS-RKSI)

```
filter(geof:sfContains(?surWKT,?pointWKT))}
```

§3 メッセージ間の関係補完

5.2 節 §1, 5.2 節 §2 では時間的・空間的な関係について、対象となる時間リソースやジオメトリリソースの間関係を補完した。これらの関係は、ある事象間が具体的にどの時空間的な位置で関係があるか確認する際に有用である。さらに、情報源となるメッセージレベルでの影響関係を補完することで、情報更新時の影響伝搬を考慮した検索が可能になる。そこで、SWIMOTNO で定義した affect プロパティを使用し、次の SPARQL クエリによりメッセージ間の四次元的な影響を意味する関係を補完した。

```
CONSTRUCT { ?message1 so:affect ?message2 .}
WHERE {
  ?message1 ro:0010002/cc:describes ?process1 .
  ?process1 cco:occurs_at ?asv1 ;
    cco:occurs_on ?time1 .
  ?asv1 so:contains ?point1 .
  ?message2 ro:0010002/cc:describes ?process2 .
  ?process2 cco:has_process_part ?process2a .
  ?process2a cco:occurs_at ?point1 ;
    cco:occurs_on ?time2 .
  ?time1 cco:has_inside_instant ?time2 .}
```

これにより、ある msg1 が msg2 に四次元的に影響を与えるという関係が追加される。本研究においては、AIXM または IWXXM メッセージが FIXM メッセージに影響を与えるという関係が追加される。この関係は、飛行経路を変更する必要性が高いことを意味している。

5.3 運航関連情報の検索例

図 11 に示す 6 月 6 日 21 時 00 分仙台国際空港 (RJSS) 発、23 時 11 分仁川国際空港 (RKSI) 着のフライトプランのシナリオに関して、四次元的に影響する事象に関するメッセージを次の SPARQL クエリにより検索が可能である。

```
SELECT ?message1 ?message2 WHERE {
  ?message1 so:affect ?message2 .
  ?message2 ro:0010002 ?flight .
  ?flight fl:gufi "c94bdeb0-9c32-432a-a7d6-0555
    b69d080d" .}
```

各運航に関するフライトプランには Globally Unique Flight Identifier (GUFID) という一意な識別子を使用して

いる。結果として、図 11 に示した 1 件の特別気象情報（激しい乱気流）が該当し、このフライトプランは再設計が必要であることが確認できた。Intel Xeon CPU E5-2660, メモリ 64GB の Windows サーバ上で実験を行い、検索実行時間は 0.1 秒以内であった。

さらに次の SPARQL クエリにより、航空機通過時刻 1 時間前に飛行経路上のウェイポイントに影響を与える事象のメッセージを検索することが可能である。ウェイポイントは航空機の飛行経路設定に使用される地理上の点である。

```
SELECT distinct ?message1 ?message2 WHERE {
  ?message1 ro:0010002/cc:describes ?process1 .
  ?process1 cco:occurs_at ?asv1 ;
    cco:occurs_on ?time1 .
  ?asv1 so:contains ?point1 .
  ?message2 ro:0010002/cc:describes ?process2 .
  ?process2 cco:has_process_part ?process2a .
  ?process2a cco:occurs_at ?point1 ;
    cco:occurs_on ?time2 .
  ?time1 time:hasBeginning/time:inXSDDateTime ?
    begin1;
    time:hasEnd/time:inXSDDateTime ?end1 .
  ?time2 fl:absoluteTime ?instant .
  bind(xsd:dateTime(str(?instant)) as ?pt)
  bind((?begin1 - ?pt) as ?ddl)
  bind("P00DT01H00M00S"^^xsd:dayTimeDuration as
    ?dd)
  filter(?ddl < ?dd && ?ddl > "P00DT00H00M00S"^^
    xsd:dayTimeDuration)}
```

この結果、1 件の特別気象情報が該当した。検索実行時間は 0.8 秒であった。この特別気象情報による飛行経路の緊急的な変更は生じないが、気象予報が変更されて当初の予報よりも特別気象が長引く場合には飛行経路の変更が求められる場合がある。このように、フライトプランに四次元的に影響のある情報だけでなく、時間や空間の条件を変更して柔軟な検索を行うことが可能である。

6. 評価と考察

6.1 提案手法の評価と考察

本章では、本研究で構築したオントロジーについて応用の観点から性能を評価し、考察する。表 3 に、本研究で定めた SWIM テストシステムの検索内容と、各手法における実行可否、検索範囲の拡張性を記した評価結果を示す。ここで、提案手法 1 は本研究で構築したドメインオントロジー FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O を使用する手法とし、提案手法 2 は参照オントロジー SWIMONTO および SWIMONTO に基づいて洗練した FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O を使用する手法とする。既存手法は BEST プロジェクトにより開発された AIXM-O, IWXXM-O を使用する手法とする。ただし FIXM に関しては OWL オントロジーが存在しないため、本研究で構築した FIXM-O を使用する。表 3 における検索範囲の拡張性とは、検索

表 3 SWIM テストシステムの検索性能

ID	検索要件	手法	実行可否	検索範囲の拡張性
Q1	表 4 に示す異種情報間の四次元的な影響の検索	提案手法 1	可能	低い
		提案手法 2	可能	高い
		既存手法	不可能	-
Q2	異種情報に三次元的に影響し、かつ時間的に近接する情報の検索	提案手法 1	可能	低い
		提案手法 2	可能	高い
		既存手法	不可能	-
Q3	異種情報に二次元的かつ時間的に影響し、かつ高度が近接する情報の検索	提案手法 1	可能	低い
		提案手法 2	可能	高い
		既存手法	不可能	-
Q4	異種情報間の四次元的な影響の連鎖的な検索	提案手法 1	部分的に可能	低い
		提案手法 2	可能	高い
		既存手法	不可能	-
Q5	同種情報内の検索	提案手法 1	部分的に可能	-
		提案手法 2	部分的に可能	-
		既存手法	部分的に可能	-

表 4 時間的關係と空間的關係の組み合わせによる異種情報間の影響

空間的關係\時間的關係		$t_1 = \text{Interval}, t_2 = \text{Interval}$ または $\text{Instant}(\text{Inside}$ の時のみ)						
		$\text{Contains}(t_1, t_2)$	$\text{Starts}(t_1, t_2)$	$\text{Finishes}(t_1, t_2)$	$\text{Meets}(t_1, t_2)$	$\text{Overlaps}(t_1, t_2)$	$\text{Equals}(t_1, t_2)$	$\text{Inside}(t_1, t_2)$
$s_1 = \text{Polygon}, s_2 = \text{Point}$	$\text{Contains}(s_1, s_2)$	-	-	-	-	-	-	4D
$s_1 = \text{Polygon}, s_2 = \text{Line}$	$\text{Intersects}(s_1, s_2)$	4D	3D,4D	3D,4D	3D,4D	3D,4D	4D	-
$s_1 = \text{Polygon}, s_2 = \text{Polygon}$	$\text{Contains}(s_1, s_2)$	4D	4D	4D	4D	4D	4D	-
	$\text{Overlaps}(s_1, s_2)$	4D	4D	4D	4D	4D	4D	-

範囲となるデータの種類を増やしても、同一のクエリで対応可能であるかという性能を表す項目として設けた。参照オントロジーのモデルとしての拡張性が高まると、対象とするドメインオントロジーが増加した場合でも適切にマッピングすることができ、検索範囲の拡張性が高まることにつながる。本研究の評価においては、FIXM, AIXM の 2 種間の検索と、FIXM, AIXM, IWXXM の 3 種間の検索で、クエリの変更の必要がない場合に検索範囲の拡張性が高いとしている。また、表 4 に評価で扱う時間的關係と空間的關係の組み合わせと影響が及ぶ次元の表を示す。表 4 の空間的關係において Point は主にフライトプランにおける軌道通過点であり、Line は軌道のジオメトリである。Polygon は空域のジオメトリである。また、この表では高度に関して s_1 が s_2 を包含しているとする。例えば、ある事象 $E_1(s_1, t_1)$, $E_2(s_2, t_2)$ において $\text{Intersects}(s_1, s_2) \sqcap \text{Contains}(t_1, t_2)$ ならば、 E_1 は E_2 に四次元的に影響を与えることを示している。また、 $\text{Intersects}(s_1, s_2) \sqcap \text{Starts}(t_1, t_2)$ ならば、 t_1 と t_2 の重なり程度により E_1 が E_2 に与える影響は三次元または四次元と変化することを示している。ハイフンは成立しない関係である。

表 3 の全体の結果から、提案手法 1 により既存手法で不可能な検索を実現できたことと、提案手法 2 により SWIMONTO がシステムとしての拡張性を高め、さらに

異種情報間の影響の連鎖的な検索にも多く対応できるようになったことがわかる。特に、提案手法 2 では Q2, Q3 において少なくとも 2 種から 3 種へと異種情報への拡張性が高まっているが、これは、SWIMONTO により各情報の表現する時間的・空間的な次元を区別して異種情報間で共通概念を認識できることが寄与している。したがって、SWIMONTO により本研究で対象とした 3 種類の情報間において、概念レベルで意味的な相互運用性を高めることができたと言える。今後 SWIM で新たな種類の情報交換モデルが採用された場合に、SWIMONTO へのマッピング手法の適用により意味的な相互運用性を維持できる可能性がある。

既存手法が全ての要件で実行不可能であるのは、地理空間表現が不十分であり、ジオメトリ検索が不可能であることが原因である。Q4 において提案手法 1 は、SELECT 句をネストしたクエリを使用することである程度は対応できるが、連鎖回数に応じてクエリのネスト回数や条件を増やさなければならず、手動での対応が必要である。一方で、提案手法 2 では SWIMONTO の affect プロパティにより、異種情報間の影響が明示的に記述されている。したがって、SPARQL 1.1 のプロパティパス機能^{*15}により、次のようなクエリで連鎖回数にかかわらず一括

*15 <https://www.w3.org/TR/sparql11-property-paths/>

で検索が可能である。

```
SELECT ?m1 ?m2 WHERE {?m1 so:affect+ ?m2 .}
```

このように、提案手法 2 は拡張性を高めるだけでなく、検索の利便性やクエリの保守性においても有用であると言える。

6.2 実用性についての考察

AIXM と IWXXM のデータには有効期限が設定されており、制約条件により有効期限が異なるが平均して 1, 2 週間程度の有効期限である。実運用環境では無効となったデータは破棄し、常に一定のデータ量を保持することを想定している。本研究ではこれらのデータに関して約一ヶ月の間に発行されたデータを蓄積して SWIM テストシステムで実験を行っており、実運用を想定した場合においても一定の実用性があると考えられる。

実運用時は、同種情報内の検索と異種情報間の検索が想定される。同種情報内の検索は表 3 の Q5 に該当し、AIXM, IWXXM は上述の通り十分にデータを収集することができ、実運用を想定した環境で実行可否を確認できている。しかし、フライト情報を表す FIXM に関しては現時点では実用化されておらず 4DT を含む実際の飛行計画が取得できないため、本研究では FIXM データの大規模な蓄積と、FIXM 同士の検索は対象としていない。現在 SWIM に基づいた運用環境では、エアラインは離陸前に 4DT を含む飛行計画 (Flight Plan: FPL) の FIXM メッセージを航空管制業務提供機関 (ANSP) に送信することが検討されている。そこで、本研究の実験では模擬飛行計画として離陸前の FIXM FPL メッセージ交換を想定しており、1 つの FIXM FPL メッセージが与えられたときの AIXM や IWXXM との横断的な検索により、飛行計画変更の必要性を把握することができるのか検証した。これは表 3 の Q1~Q4 に該当する。なお、5.3 節では、この中でも Q1, Q2 に相当する検索を SPARQL とともに例示している。実験では、過去に実運航された飛行計画をもとに日時を変更した 9 つの FIXM FPL メッセージを作成した。結果として、横断的な検索が可能であることと、提案手法により拡張性が高まったことを確認し、想定する SWIM 運用環境において実用性があると考えられる。仮に、日本国内の 1 日のフライト情報を対象とする場合は約 5,000 件となるが、これらを全て提案したオントロジーに基づいてナレッジグラフ化して約一ヶ月分のデータを蓄積すると、ジオメトリ検索に膨大な時間を要することが想定される。そのため、FIXM を蓄積する場合でも運航時間や管理空域の通過時間をもとに蓄積するデータを制限し、不要となったデータは破棄することで運用が可能となる。

本研究では航空機の離陸前の情報共有を前提とし、RDF, OWL, SPARQL などのセマンティック Web 基盤技術が、航空交通管理における情報共有に有用であることが確認

できた。将来的に SWIM では航空機の離陸後の情報更新も対象とする。したがって、将来的にリアルタイム性が求められるため、本研究で使った技術に加えてストリーム推論 [市瀬 15] などのセマンティック Web 技術の導入による発展性も期待できる。

7. ま と め

本研究では、SWIM 環境における航空交通情報共有の高度化に向けて、情報交換モデルに基づくドメインオントロジーを構築し公開した。また、異種情報間の意味的な相互運用性の実現に向けて参照オントロジーを構築し、各ドメインオントロジーを洗練しながら共通オントロジーへマッピングする手法を提案した。これにより、異種情報間の時空間的な影響を連鎖的に、かつ高い拡張性を持って検索可能になり、意味的な相互運用性の向上に寄与したことを確認した。この一連の手法からなる本研究の枠組みは、航空交通分野に限らず、異なる情報交換モデルが先行して存在する環境において、意味的な相互運用性を実現するための一助となると考える。

今後、運航ルールおよび四次元飛行軌道を考慮したオントロジーの拡張と洗練、様々な応用について検討する。また、収集対象のデータとフライトプランのシナリオを増加して検索性能や推論性能の評価を行う。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 19H04168, 19K24375 の助成を受けたものです。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Allen 83] Allen, J. F.: Maintaining knowledge about temporal intervals, *Commun. ACM*, Vol. 26, No. 11, pp. 832–843 (1983)
- [Batsakis 11] Batsakis, S. and Petrakis, E. G.: SOWL: A framework for handling spatio-temporal information in OWL 2.0, in *International Workshop on Rules and Rule Markup Languages for the Semantic Web*, pp. 242–249 (2011)
- [Battle 12] Battle, R. and Kolas, D.: Enabling the geospatial semantic web with parliament and geosparql, *Semantic Web*, Vol. 3, No. 4, pp.355–370 (2012)
- [Bedini 11] Bedini, I., Matheus, C., Patel-Schneider, P. F., Boran, A., and Nguyen, B.: Transforming XML schema to OWL using patterns, in *2011 IEEE 5th International Conference on Semantic Computing*, pp. 102–109 (2011)
- [Choi 06] Choi, N., Song, I.-Y., and Han, H.: A survey on ontology mapping, *ACM Sigmod Record*, Vol. 35, No. 3, pp. 34–41 (2006)
- [Elmhadi 19] Elmhadi, L., Karray, M.-H., and Archimède, B.: Toward the use of upper-level ontologies for semantically interoperable systems: An emergency management use case, in *Enterprise Interoperability VIII*, pp. 131–140, Springer (2019)
- [Hacherouf 15] Hacherouf, M., Bahloul, S. N., and Cruz, C.: Transforming XML documents to OWL ontologies: A survey, *Journal of Information Science*, Vol. 41, No. 2, pp. 242–259 (2015)
- [ICAO 05] ICAO: *Global Air Traffic Management Operational Concept*, ICAO Doc 9854, AN/458, ICAO (2005)
- [ICAO 14] ICAO: *Manual on the Digital Exchange of Aeronautical Meteorological Information*, ICAO Doc 10003, ICAO (2014)
- [ICAO 15] ICAO: *Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept*, ICAO Doc 10039, ICAO (2015)

- [市瀬 15] 市瀬龍太郎: ストリーム推論 (<特集> Linked Data とセマンティック技術), 人工知能, Vol. 30, No. 5, pp. 574–579 (2015)
- [Karray 19] Karray, M. H., Ameri, F., Hodkiewicz, M., and Louge, T.: ROMAIN: Towards a BFO compliant reference ontology for industrial maintenance, *Applied Ontology*, Vol. 14, No. 2, pp. 155–177 (2019)
- [Keller 16] Keller, R. M.: Ontologies for aviation data management, in *IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pp. 1–9 (2016)
- [Keller 17] Keller, R. M.: *The NASA Air Traffic Management Ontology: Technical Documentation*, Technical Memo, NASA/TM-2017-219526, National Aeronautics and Space Administration (2017)
- [Keller 19] Keller, R. M.: Building a knowledge graph for the air traffic management community, in *Companion Proceedings of the 2019 World Wide Web Conference*, p. 700–704 (2019)
- [来村 08] 来村徳信, 瀬川翔, 笹島宗彦, 溝口理一郎: 機能語彙体系間のオントロジー的マッピングに基づく相互運用性, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, Vol. 2008.18, pp. 42–47 (2008)
- [国土 19] 国土交通省航空局, 気象庁, NPO 法人 AIM-JAPAN 編集協会: *Aeronautical Information Manual Japan*, 2019 年前期版, 日本航空機操縦士協会 (2019)
- [小路 07] 小路悠介, 来村徳信, 加藤義清, 筒井良夫, 溝口理一郎: 相互運用性を指向した機能・不具合知識の統合とその概念写像に基づく知識変換, 人工知能学会論文誌, Vol. 22, No. 1, pp. 78–92 (2007)
- [Kovacic 17] Kovacic, I., Steiner, D., Schuetz, C., Neumayr, B., Burgstaller, F., Schrefl, M., and Wilson, S.: Ontology-based data description and discovery in a SWIM environment, in *2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pp. 5A4 1–13 (2017)
- [古崎 16] 古崎晃司, 来村徳信, 溝口理一郎: 生物規範工学オントロジーと Linked Data に基づくキーワード探索, 人工知能学会論文誌, Vol. 31, No. 1, pp. LOD–D 1 (2016)
- [Lohmann 16] Lohmann, S., Negru, S., Haag, F., and Ertl, T.: Visualizing ontologies with VOWL, *Semantic Web*, Vol. 7, No. 4, pp. 399–419 (2016)
- [Lu 19] Lu, X., Morioka, K., Koga, T., and Sumiya, Y.: Collaborative flight and flow information exchange to achieve seamless air traffic management operation, in *Proc. of IEEE 14th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, pp. 135–140 (2019)
- [榎屋 14] 榎屋啓志, 溝口理一郎: 遺伝学オントロジー, 人工知能学会論文誌, Vol. 29, No. 3, pp. 311–327 (2014)
- [Miles 05] Miles, A., Matthews, B., Wilson, M., and Brickley, D.: SKOS core: Simple knowledge organisation for the web, in *International Conference on Dublin Core and Metadata Applications*, pp. 3–10 (2005)
- [Neumayr 17] Neumayr, B., Gringinger, E., Schuetz, C. G., Schrefl, M., Wilson, S., and Vennesland, A.: Semantic data containers for realizing the full potential of system wide information management, in *IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pp. 1–10 (2017)
- [Rudnicki 17] Rudnicki, R.: An overview of the common core ontologies, *CUBRC*, Buffalo (2017)
- [Smith 05] Smith, B., Kumar, A., and Bittner, T.: *Basic Formal Ontology for Bioinformatics*, IFOMIS Reports (2005)
- [Vennesland 19] Vennesland, A., Keller, R. M., Schuetz, C. G., Gringinger, E., and Neumayr, B.: Matching ontologies for air traffic management: A comparison and reference alignment of the AIRM and NASA ATM ontologies, in *Proceedings of the 14th International Workshop on Ontology Matching Co-located with the 18th International Semantic Web Conference (ISWC 2019)*, pp. 1–12 (2019)

[担当委員: 大向 一輝]

2020 年 5 月 29 日 受理

——著 者 紹 介——

江上 周作(正会員)

2019 年電気通信大学大学院情報理工学研究科博士課程修了。同年、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所入所。同所研究員を経て、2020 年より国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター研究員。法政大学理工学部兼任講師。電気通信大学協力研究員を兼任。現在に至る。博士 (工学)。2018 年度本学会研究会優秀賞受賞。セマンティック Web とオントロジーに関する研究に従事。情報処理学会会員。

呂 曉東

2005 年東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了。同年東京工業大学助教。2012 年電子航法研究所入所。博士 (工学)。分散コンピューティング、航空監視システム、航空交通情報管理システムなどの研究に従事。電子情報通信学会会員、IEEE シニア会員。

古賀 禎

1993 年東京理科大学理工学部電気学科卒業。1995 年同大学院理工学研究科修士課程修了。同年、運輸省電子航法研究所入所。2001 年カリフォルニア大学デービス校客員研究員。博士 (工学)。二次監視レーダ、空港面監視システムの研究に従事。

住谷 泰人

1993 年北海道大学工学部電気工学科卒業。同年、運輸省電子航法研究所入所。入所以来、航空機衝突防止装置、パイロット用視覚援助システム等の航空機上監視システム、航空衛星、空港面等の航空通信システムに関する研究に従事。2011 年北海道大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。現在、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所監視通信領域領域長および研究監 (電子航法分野)。電子情報通信学会、日本航空宇宙学会、日本航海学会 (航空宇宙研究会会長) 各会員。