

DOI:10.11918/202310060

融合 COLREGs 的水上交通场景认知建模

文元桥^{1,2,3},程小东^{1,2},黄亮^{1,2,3},黄亚敏^{1,2},徐顺强^{1,2},钟书彬^{1,2}

(1. 水路交通控制全国重点实验室(武汉理工大学),武汉 430063;2. 国家水运安全工程技术研究中心(武汉理工大学),武汉 430063;3. 武汉理工大学 三亚科教创新园,海南 三亚 572000)

摘要:为实现国际海上避碰规则(COLREGs)场景的语义表达与推理,让船舶具备类人的水上交通场景理解与推理能力,提出一种融合 COLREGs 的场景认知计算建模方法。基于 COLREGs 水上交通场景的语义描述,将水上交通场景解析为时间、对象、属性、关系、行为、事件等要素相互作用的综合体,构建水上交通场景的概念模型;采用本体建模实现 COLREGs 场景概念模型的结构化表达;通过定义语义计算操作函数和触发集搭建 COLREGs 场景认知计算框架,进而提出一种基于逻辑推理的场景认知计算方法。选取厦门港环境和船舶 AIS 数据,在场景语义抽取的基础上对 COLREGs 场景认知模型进行案例验证,结果表明:相对于数据驱动的方法,所提模型能够对场景中的对象属性、船舶行为、事件等进行描述和语义计算,并能更好地支持场景中各类要素相关知识的获取与查询。研究提出的场景认知建模方法对于船舶实现规则约束下的场景自主认知具有可行性和有效性。

关键词:水路运输;COLREGs;水上交通场景;知识建模;知识表达;本体

中图分类号:U675 文献标志码:A 文章编号:0367-6234(2024)11-0151-11

Cognitive modeling of waterborne traffic scenario incorporating COLREGs

WEN Yuanqiao^{1,2,3}, CHENG Xiaodong^{1,2}, HUANG Liang^{1,2,3}, HUANG Yamin^{1,2}, XU Shunqiang^{1,2}, ZHONG Shubin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety (Wuhan University of Technology), Wuhan 430063, China;

2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety (Wuhan University of Technology), Wuhan 430063, China;

3. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572000, Hainan, China)

Abstract: To achieve semantic expression and reasoning of scenarios under the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), enabling ships to understand and reason about waterborne traffic scenarios similarly to humans, a scenario cognition computing modeling method incorporating COLREGs is proposed. Based on the semantic description of waterborne traffic scenarios under COLREGs, this approach parses the scenarios into a comprehensive system of interactions among elements such as time, objects, attributes, relations, behaviors, and events, thereby constructing a conceptual model of waterborne traffic scenarios. It employs ontological modeling to structure the expression of the COLREGs scenario conceptual model. Through defining semantic computational operation functions and trigger sets, a COLREGs scenario cognition computing framework is established, leading to the proposal of a logic reasoning-based scenario cognition computing method. The model is validated with case studies using the environment of Xiamen Port and ship AIS data based on semantic extraction from scenarios. The results shows that, compared to data-driven model, the proposed model can describe and computationally process object attributes, ship behaviors, and traffic events in scenarios, and support the acquisition and querying of related knowledge of various elements within the scenario. The proposed scenario cognition modeling method is feasible and effective for enabling autonomous scenario cognition of ships under rule constraints.

Keywords: water transportation; COLREGs; waterborne traffic scenario; knowledge modeling; knowledge expression; ontology

船舶智能化是水路运输发展的重点和前沿,其中自主感知、态势理解和航行决策是船舶智能驾驶的技术核心。武汉理工大学严新平院士团队设计并

提出了“航行脑系统”概念^[1],详细阐述了航行脑系统在感知、认知和决策执行3个功能空间的工作原理,支撑船舶智能航行。其中感知空间是获取船舶

收稿日期:2023-10-24;录用日期:2024-03-19;网络首发日期:2024-08-15

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240814.1121.002

基金项目:三亚市科技创新专项(2022KJCX36);国家自然科学基金面上项目(52072287)

作者简介:文元桥(1975—),男,教授,博士生导师

通信作者:程小东,exd921121@whut.edu.cn

自身状态和航行环境的感知信息并进行处理,认知空间则是在感知基础上根据态势信息抽象出航行场景,从而提出决策支持。因此让船舶具备类人的场景理解与推理能力,是实现船舶自主感知与决策的关键。《国际海上避碰规则》(international regulations for preventing collisions at sea, COLREGs)等规则明确了船舶在各类水上交通场景中的责任、义务和行为准则^[2]。智能船需要自动适应和遵守这些航行规则体系,针对该问题,学者们开展了相关研究。

在航行规则知识建模方面,学者根据 COLREGs 会遇局面下避碰决策建议等知识构建了避碰决策知识库^[3],也有不少关于避碰场景的专家系统相关研究。文献[4]使用模糊逻辑构建了 COLREG 评估的可解释模型。文献[5]结合机器学习方法建立辅助避碰决策模型。文献[6]在深度学习算法中设置相应的概念奖励函数以获取最优的避碰策略。然而,将避碰规则等结构化建模并融入行为决策中依旧存在挑战。

在航行场景知识建模方面,不少学者对典型的水上交通场景进行建模,文献[7-8]基于方位划分的典型场景,设置临界缓冲区以提升避碰过程的稳定性。文献[9-10]提出了 COLREGs 中会遇场景的量化解析模型以及会遇场景中碰撞危险等关键知识的提取算法。将避碰规则纳入避碰路径决策同样可实现航行场景知识的转化,例如障碍物投影区(projected obstacle area, POA)^[11]的建立;基于 COLREGs 和海员通行做法,结合差分进化算法实现复杂情况下的路径规划^[12]。目前研究缺少对对象属性以及关系的描述,难以满足场景表达的完备性。

在航行场景知识表达方面,语义网络^[13]、本体^[14]等方法越来越受到水路运输领域的重视。文献[15]构建了一种行为语义网络以实现对船舶行为知识的表达。进一步地,文献[16]提出了多尺度船舶语义行为模型实现了场景行为的认知计算。文献[17]构建基于场景元素类和二元属性的情景结构化本体模型,从而建立避碰决策知识库。文献[18]根据目标船的方位、航向、航速关系并结合避碰规则,将船舶会遇场景划分为 12 种,其相关理论与方法可为避碰规则的知识表达提供了良好的借鉴。

从智能避碰的发展来看,最初在数据层面,避碰系统需要收集交通流数据和环境数据等作为决策系统的输入。到了辅助避碰的信息层面,研究者主要依赖几何分析方法对避碰所需数据分析,例如划定船舶领域,评估碰撞风险指数。随着计算能力的发展,速度障碍算法等各种人工智能算法相继被开发,

这些避碰决策的数学模型或者规则的量化解析形成了自动避碰的知识,是避碰决策信息的一种内化或者理解,也是当前研究最为集中的领域。而到了自主避碰的智能层面,自主化意味着避碰系统可以自主认知决策和应用规则知识。因此要实现自主避碰的从知识到智能的转变,则需要对避碰规则相关知识进行重构,这也是本文关注的重点。当智能船舶根据所处的动态场景作避碰决策时,需要调用或者构造适应这种场景的避碰规则知识。因此可以说基于专家系统或者规则量化的避碰决策,其输入只是避碰规则的信息,而避碰的自主化,需要对避碰规则场景进行知识表达来作为输入。

总之,场景的开放性、语义的多态性是制约场景认知的关键因素。COLREGs 作为船舶海上航行的避碰规则,明确了不同水上交通场景下船舶的行为规则,为面向机器的场景认知提供了语义基础。因此,有必要开展基于 COLREGs 的场景知识建模研究。首先对 COLREGs 场景进行概念建模,分析场景的定义和要素组成;其次构建 COLREGs 场景本体表达模型,厘清场景中的概念、属性和关系;再次提出基于概念和本体模型的场景认知计算框架和方法,最后进行案例验证实现 COLREGs 场景的语义表达与推理。

1 COLREGs 场景认知概念模型

1.1 COLREGs 水上交通场景的定义

定义 1 水上交通场景是一定水域、不同时空范围内各种水上交通要素相互联系、相互作用所构成的具有特定结构和功能的水域综合体。

COLREGs 定义了不同类型的船舶对象,包括机动船、从事捕鱼的船舶、操纵能力受到限制的船舶、帆船等概念;可指导船舶在不同场景下的避碰行为,包括在可见度受限、船舶会遇时如何采取行动,以及如何通过标志、灯光和声音信号进行有效通信等。它具有基于场景描述船舶行为规则的特点。例如,在互见条件下,规则 13 条规定,任何船舶在追越任何他船时,均应给被追越船让路;规则 14 条界定了任何船舶追越和两艘机动船对遇场景不同船舶的责任和义务。从该特点来看,COLREGs 是以船舶和环境为基本对象,通过明确不同水上交通场景下对象之间的约束,从而给出船舶行为指导准则。

1.2 场景的构成要素

为了使机器对规则的认识达到类人的理解水平,需在计算机中以结构化和形式化的方式表达规则中的场景知识,因此需将 COLREGs 场景进行解构。如图 1 所示,根据定义,水上交通场景的构成要

素可分为 6 个部分:1)时间要素,为场景描述提供时间尺度,包括时间点、时间段;2)对象要素,包括船舶、环境等对象,其中环境中的地点为场景描述提供空间尺度,如开阔水域、狭水道等;3)属性要素,描述场景各要素的性质和特征,如对象属性;4)关系要素,表示对象间关系,如船舶之间的会遇、船舶与环境之间的拓扑关系;5)行为要素,属性要素或关系要素的时空变化产生行为;6)事件要素,对象行为的逻辑和时序关系的联合表达。事件中包含了以上要素,同时事件的动态演变也意味着场景的改变。

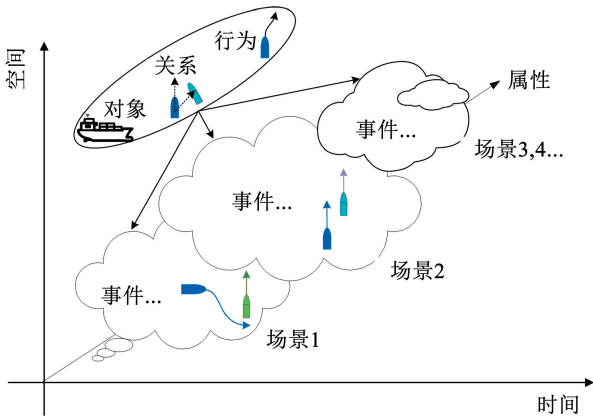


图 1 COLREGs 场景的构成要素

Fig. 1 Constituent elements of COLREGs scenario

1.3 场景的概念模型

COLREGs 作为船舶避碰行为规范,交代了“有哪些避碰场景? 场景中包含哪些对象? 场景发生在何时何地? 对象有哪些属性? 对象间有哪些关系? 对象应该采取何种行为?”。这种非结构化的知识体系难以被机器完全理解,因此需要对避碰规则知识进行概念的形式化建模。本文以四维坐标法表达 COLREGs 场景知识模型。在时空框架下, X 轴为场景包含的船舶和环境等交通对象, Y 轴为对象具有的行为知识, Z 轴为对象的属性知识, R 轴为对象与对象之间的关系知识,如图 2 所示。

2 COLREGs 场景本体模型

2.1 场景概念类

COLREGs 场景本体包括时间、对象、属性、关系、行为和事件等 6 个类。图 3 为 COLREGs 场景本体认知框架。

COLREGs 场景本体用六元组表达为

$$S_{COL} = \langle T, O, A, R, B, E \rangle \quad (1)$$

式中: S_{COL} 指场景; T 指时间类,包括时间点和时间段; O 表示对象; A 指类属性,用于描述类的特征及状态; R 指用于表示类之间的关系; B 指行为类,分为属性行为和关系行为; E 指事件类。具体表述如下:

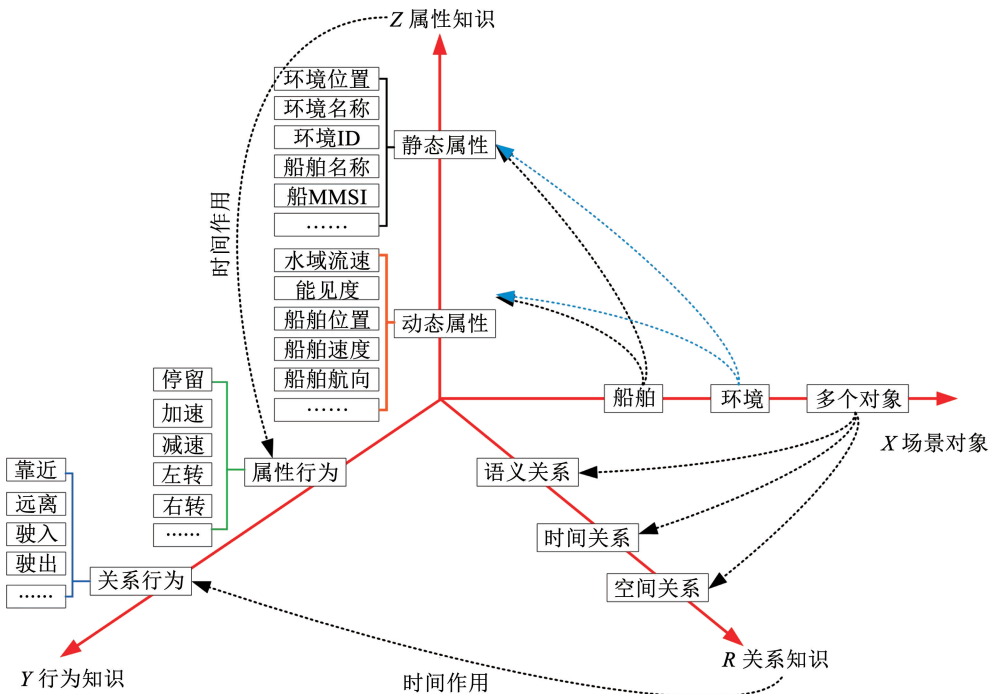


图 2 COLREGs 场景知识模型^[3]

Fig. 2 Knowledge model of COLREGs scenario^[3]

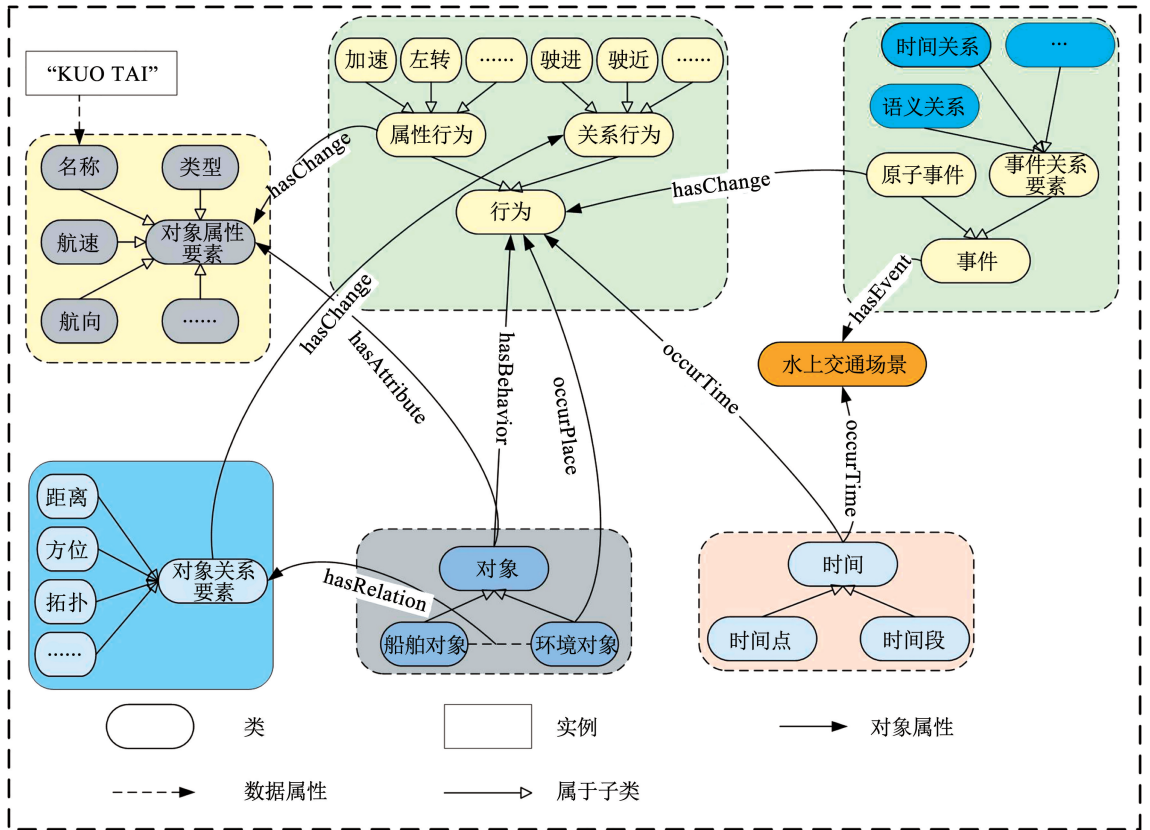


图 3 COLREGs 场景本体

Fig. 3 Ontology of COLREGs scenario

1) 时间类。时间类用来描述场景的开始时间、结束时间和持续时间。基于时间本体模型,可建立场景发生的时序逻辑关系实现推理。

2) 对象类。船舶类是 COLREGs 场景的主要对象,包括机动船、帆船、操限船等类型。环境类包括锚地、航道等通航水域以及航标等基础设施,其中环境中的地点作为时空框架中的空间被单独列出。

3) 属性类。属性类是本体中的核心类。对船舶类,其属性类可划分为静态属性(如移动识别码、船名、船长)和动态属性(如航速、航向、位置);对于环境类,其属性类可划分为物理属性(如形状、位置)和功能属性(如供航行、供锚泊)。

4) 关系类。关系类用于描述对象间的关联,根据对象与对象之间在时间维度、空间维度以及语义层面存在关联关系的不同,将其分为时序关系(先于、后于)、空间关系(距离、方位、拓扑)和语义关系(包含、跟随、触发)。

5) 行为类。行为是指对象的属性要素和关系要素在时空尺度上的变化^[14],基于此将行为划分为

属性行为(船舶的位置、航向、速度变化)和关系行为(如相对距离、相对方位的变化)。

6) 事件类。为体现对象行为的多尺度特征,将事件定义为对象行为在时空尺度上的演变。其中原子事件是用于描述对象行为变化的最小单位,对象属性行为或者关系行为的变化均可产生原子事件。在原子事件基础上,根据不同的场景结合相应的事件关系要素及特征以获取目标事件。

2.2 场景本体属性

本体类的属性特征用数据属性进行表示,用于描述场景本体中内部要素的状态以及场景认知中属性操作符获取的要素属性。部分本体数据属性见表 1。

2.3 场景本体关系构建

根据本体模型,本体中各个关键类的关系用对象属性来表示。其包含了船与环境、船与船等对象之间的关系。也包括对象与行为、事件、场景之间的语义关系等。具体场景本体关系属性见表 2。

表 1 场景本体数据属性

Tab. 1 Data attributes of the scenario ontology

类别	数据属性	含义	定义域	值域
静态属性	hasName	名称	ship/environment	string
	hasGeometry	几何形态	ship/environment	string
	hasIndex	编号	environment	integer
	hasMMSI	识别码	ship	integer
	hasShipType	船舶类型	ship	string
	hasEnvirType	环境类型	environment	string
动态属性	hasTimestamp	时间属性	ship/behaviour/event	integer
	hasCourse	航向	ship	float
	hasLocation	位置	ship/environment	float
	hasVelocity	航速	ship	float
	hasRelativeDistance	相对距离	ship	float
	hasRelativeBearing	相对方位	ship/environment	float
	hasWatersDepth	水深	environment	float
	hasFairwayCourse	航道方向	fairway	float

表 2 场景本体关系属性

Tab. 2 Relational attributes of the scenario ontology

类别	关系属性	含义	定义域	值域
语义关系	hasBehavior	有行为	ship	behavior
	hasRelation	有关系	ship/environment	relation
	hasChange	有改变	behavior/relation/attribute	atom event/behavior
	hasAttribute	有属性	ship/environment	attribute
	hasEvent	有时间	scenario	event
	hasScenario	有场景	ship	scenario
	hasTrack	有轨迹	ship	trackSegment
	hasTrackPoint	有轨迹点	trackSegment	point
	occurTime	发生时间	behavior/event/scenario	time
	occurPlace	发生地点	behavior/event/scenario	environment
	follow	跟随	behavior/event/scenario	behavior/event/scenario
	include	包含	event/scenario	behavior/event
	trigger	触发	behavior/event/	behavior/event/
	isPartOf	属于	behavior/event/scenario	behavior/event/scenario
reflect	反映	trackSegment	behavior	
时间关系	before/after	先于/后于	time	time
空间关系	inside/outside	在里/外面	ship	environment
	away/near	远离/靠近	ship	ship/environment

3 COLREGs 场景认知计算

认知计算使用计算学科的理论、方法和工具来为认知任务建模。其使用各种模型和算法实现对信息的表示和处理,为赋予计算机场景处理能力提供了可能。本节首先提出了一种 COLREGs 场景认知计算框架,进而提出一种基于逻辑推理的场景认知

计算方法,最终帮助计算机系统实现 COLREGs 场景的智能认知。

3.1 场景认知计算框架

基于第 1 节对 COLREGs 场景的概念与要素分析,将场景认知计算表达为一个元组,以形式化语法的方式转化为计算机可理解的语言,即

$$S_{\text{comp}} : (S_{\text{COL}}, F, T_{\text{rg}}) \quad (2)$$

式中： S_{COL} 表示一个基本 COLREGs 场景； F 表示语义计算操作函数的集合，这里需要结合场景中对象的属性和关系等特征为基本变量触发集，利用数学方程和逻辑操作计算场景数据的变化以判断是否产生新的场景知识，可以形式化表示为 $F = \{f_{\Theta}(\phi)\}$ ，其中 $f(\cdot)$ 表示函数的计算规则， ϕ 表示变量，包含场景要素属性或关系， Θ 表示操作符，用于执行对输入变量的操作； T_{rg} 表示触发集，是参数的集合，用于表达元组表达式的触发条件和激活规则。

操作符的主要内容如下： Θ_{arith} 表示算术操作符，用于对场景要素的数值属性进行数学运算，如加法、减法、乘法和除法； Θ_{com} 表示比较操作符，主要执行对变量之间的比较操作，包含小于 ($<$)、大于 ($>$)、不等于 (\neq) 等运算操作； Θ_{logic} 表示逻辑操作符，包括与、或、非等逻辑运算，用于处理场景中多个变量之间的逻辑关系，例如，可以使用逻辑与操作符来表示场景要素 A 和场景要素 B 同时存在的情况； Θ_{qua} 表示量词操作符，主要用于限制条件成立的范围，主要包含存在量词 (\exists) 和任意量词 (\forall) 等操作符； Θ_{clock} 表示时间操作符，用于处理场景要素的时间属性和时间关系，包括时间戳、时间间隔和时间关系计算，用于确定场景发生的时间、时间跨度或时间关系； Θ_{rel} 表示语义关系操作符，语义关系主要分为包含关系 (include)、触发关系 (trigger)、并行关系 (parallel)、跟随关系 (follow) 和终结关系 (end) 5 种； Θ_{simi} 表示相似性操作符，用于比较场景要素之间的语义相似性，可以根据要素的语义属性，如主题、含义或概念，来评估要素之间的相似程度。

触发集中的参数通过函数集内的计算规则进行处理，如果计算结果满足特定的参数条件，系统将捕获到场景要素特征的变化，从而触发场景认知计算。参数主要分为两大类：数值型参数和逻辑型参数。

执行认知计算时，以场景认知要素为输入，输出为场景以及场景中对象、属性、关系、行为、时间、空间等各类要素相关的知识。

3.2 场景认知计算方法

采用语义网规则语言^[19] (semantic web rule language, SWRL) 的和基于公理的推理规则两种方

法实现 COLREGs 场景的认知计算。

SWRL 是一种用于定义复杂关系和本体含义的语义 Web 规则语言，允许形式化地明确各要素之间的直接以及间接联系，是本文认知计算的主要方法。SWRL 的应用主要采用以下两种形式的表达：1) $C(? x)$ 表达类的实例，其中 C 表示概念 (类)， x 表示类的一个实例，例如 $Fairway(? x)$ 表示航道类的一个实例 x ；2) $P(? x, ? y)$ 表达实例之间的关系，P 表示类之间的关系， x 和 y 分别表示不同类的实例，例如使用 x 表示轨迹点的实例， y 表示轨迹段的实例， $isPartOf(? x, ? y)$ 表示轨迹点是轨迹段的组成部分。SWRL 规则包括推理前提和结论，两者通过箭头 (\rightarrow) 连接，中间“ \wedge ”符号表示逻辑“与”。

公理用于描述客观事实，可通过定义对象属性约束和关系进行规则推理。如船舶移动可以表示为 $MoveScenario = hasChange\ some\ shipLocation$ 。复杂的公理需定义知识的充分必要条件。如船舶驶出锚地的充要条件为：包含船舶和锚地两个对象；船舶轨迹段与锚地拓扑关系为相交，且船舶轨迹起点在锚地内，终点在锚地外，可表示为 $SailOutAnchorage = (intersect\ some\ anchorage)\ and\ (hasBeginPoint\ some\ (inside\ some\ anchorage))\ and\ (hasEndPoint\ some\ (outside\ some\ anchorage))\ and\ (reflects\ some\ move)$ 。

使用 Drools 作为本体的推理引擎，该引擎基于 java 的产生式规则，能快速处理规则与事实，同时支持规则的多种表达。它通过模式匹配器对收集的事实与规则库进行匹配，使用议程机制来处理可能出现的规则冲突。以包含船舶行为和环境数据的场景实例为基础，开展场景知识的认知计算，如图 4 所示。

4 案例分析

4.1 实验工具和数据

实验采用 protégé5.5 构建 COLREGs 场景本体。选取厦门港主航道附近水域为实验区域，区域经度为 $117^{\circ}45'$ ~ $118^{\circ}24'$ ，纬度为 $24^{\circ}12'$ ~ $24^{\circ}36'$ 。抽取厦门港内活动的船舶 AIS 数据，获取船舶静态与动态属性信息，对 AIS 数据进行去噪、插值、平滑等处理后得到船舶活动轨迹段，如图 5 所示。

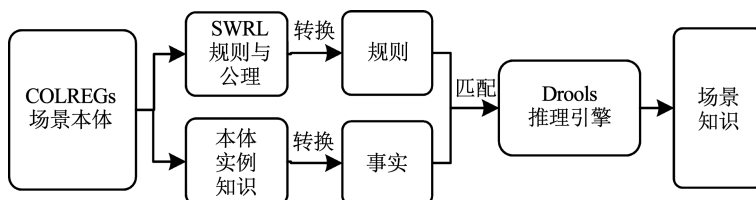


图 4 场景知识认知计算流程

Fig. 4 Process of cognitive computing for scenario knowledge

No	TrackPoint	MMSI	Time	Lat	Lon	COG	SOG	Course_change	Speed_change	Topology	Place
0	P1	371625000	1460492704	24.28928	118.282	257.8	8.3	Begin point	Begin point	Outside	
1	P2	371625000	1460492714	24.2892	118.2815	257.7211	8.378947	KeepCourse	Accelerate	Outside	
2	P3	371625000	1460492724	24.28911	118.2811	257.6421	8.457895	KeepCourse	Accelerate	Outside	
3	P4	371625000	1460492734	24.28902	118.2807	257.5632	8.536842	KeepCourse	Accelerate	Outside	
4	P5	371625000	1460492742	24.28895	118.2803	257.5	8.6	KeepCourse	Accelerate	Outside	
5	P6	371625000	1460492752	24.28886	118.2799	257.5244	8.673171	KeepCourse	Accelerate	Outside	
6	P7	371625000	1460492762	24.28877	118.2794	257.5488	8.746341	KeepCourse	Accelerate	Outside	
7	P8	371625000	1460492772	24.28868	118.279	257.5732	8.819512	KeepCourse	Accelerate	Outside	
8	P9	371625000	1460492782	24.28859	118.2785	257.5976	8.892683	KeepCourse	Accelerate	Outside	
9	P10	371625000	1460492793	24.28849	118.2781	257.5474	8.952632	KeepCourse	Accelerate	Outside	
10	P11	371625000	1460492802	24.2884	118.2777	257.5	9	KeepCourse	Accelerate	Outside	
...
339	P340	371625000	1460515461	24.48867	118.0655	29.2	7.3	Port	Decelerate	Inside	Anchorage
340	P341	371625000	1460515541	24.49097	118.0668	24.6	6.8	Port	Decelerate	Inside	Anchorage
341	P342	371625000	1460515581	24.49213	118.0672	19.4	6.6	Port	Decelerate	Inside	Anchorage
...

图 5 船舶行为语义知识提取

Fig. 5 Extraction of semantic knowledge on ship behavior

4.2 场景语义抽取

场景语义抽取是将船舶活动数据与地理环境数据转化为场景认知计算所需的语义信息,具体包括:

- 1) 轨迹与属性的语义关联, 将包括船名、航速等在内的船舶属性信息与轨迹点关联, 并将包括环境名称、流速等在内的属性信息与轨迹段进行关联;
- 2) 船舶属性行为抽取, 利用船舶轨迹数据中航向、航速等属性数据的变化标记船舶操纵行为, 以船舶

KuoTai 为例, 获取其经纬度、航向、航速数据, 设置移动航速阈值为 0.4 节、船舶转向阈值为 3°, 从而提取出船舶轨迹中停留、转向、变速等基本属性行为; 3) 空间关系行为抽取, 考虑到船舶和航行环境之间交互产生的行为语义, 计算船舶与其他空间环境之间的方位、距离和拓扑关系, 并进行语义标注得到场景中的行为知识, 以船舶 KUO TAI 为例, 部分语义关联及标注如图 6 所示。

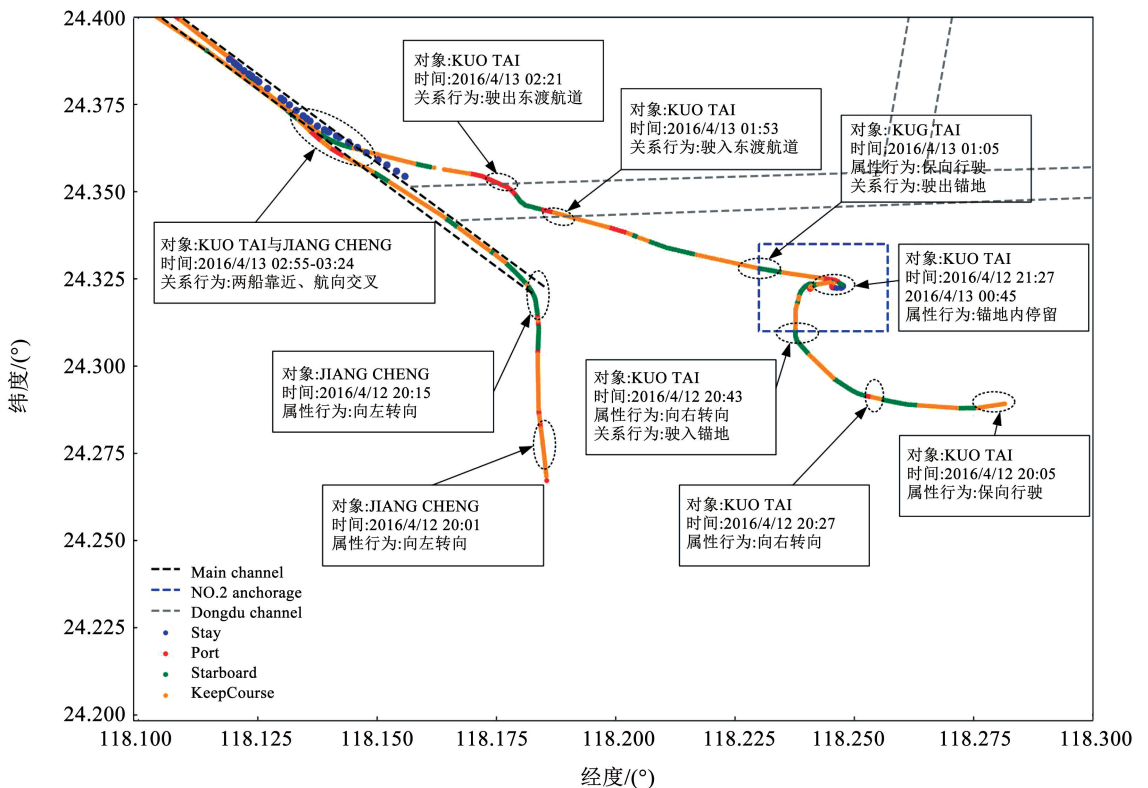


图 6 语义抽取与标注

Fig. 6 Semantic extraction and annotation

对于每一类典型的水上交通场景,在计算机系统内部采用结构式进行表达,以 KUO TAI 号船舶锚

泊为例,如图 7 所示。

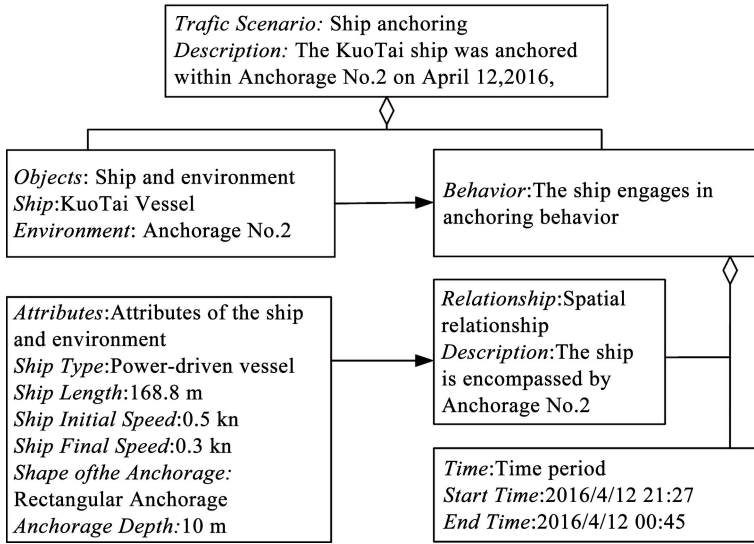


图 7 锚泊场景的语义结构化描述

Fig. 7 Semantic structured description of the anchoring scenario

4.3 场景认知计算

在语义标注的基础上,需进一步整合和计算场景语义知识以实现 COLREGs 场景的智能认知。以船舶 KUO TAI 为例,将船舶的属性信息、语义分割标注后的 16 个轨迹段信息导入到本体中,形成水上交通场景实例库,如图 8 所示。其中部分轨迹段的起始点位置、时刻以及航速等信息如图 9 所示。

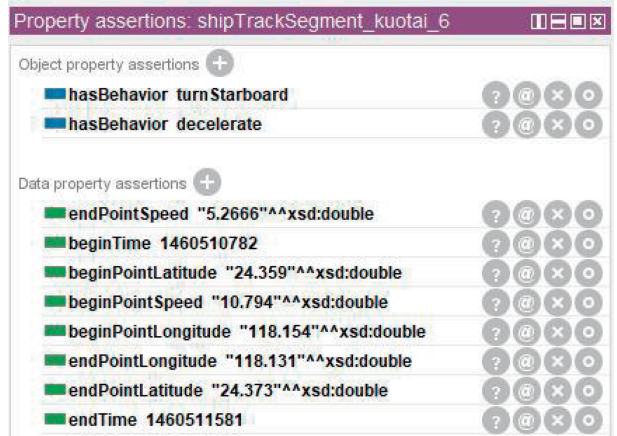


图 9 船舶 KUO TAI 轨迹段实例构建

Fig. 9 Construction of the track segment instance for the ship KUO TAI

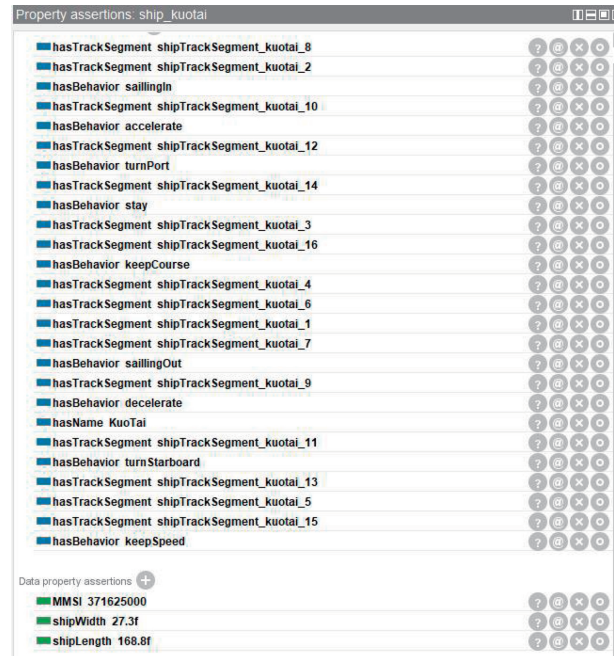


图 8 船舶 KUO TAI 实例构建

Fig. 8 Construction of the instance for the ship KUO TAI

运用 SWRL 规则对场景中的拓扑行为、基本事件、典型场景进行描述。例如,加速行为的形式化表达为

$$S^{Acc} = \{P^{ship}, P^{shipBehavior}, [t_i, t_{i+1}]\} = \{ (Name, "X"), (velocity, "a", t_i), (velocity, "b", t_{i+1}), (dvelocity, a < b, [t_i, t_{i+1}]) \} \quad (3)$$

可由以下认知计算得出: $ship(?s) \wedge track(?t) \wedge hasTrack(?s, ?t) \wedge Point(?p1) \wedge Point(?p2) \wedge hasBeginPoint(?t, ?p1) \wedge hasEndPoint(?t, ?p2) \wedge hasVelocity(?p1, ?v1) \wedge hasVelocity(?p2, ?v2) \wedge swrlb:lessThan(?v1, ?v2) \rightarrow hasScenario(?s, AccelerateScenario)$ 。同理,可能涉及到的逻辑推理规则库见表 3。

表 3 逻辑推理规则库

Tab.3 Rule base for logical reasoning

编号	SWRL 语句	描述
1	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge reflects(? t, ? b) \wedge behavior(? b) \rightarrow hasBehavior(? s, ? b)$	船舶轨迹反映船舶行为
2	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge hasBehavior(? s, ? y) \rightarrow hasScenario(? s, ? y)$	船舶动态行为产生航行场景
3	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge Point(? p1) \wedge Point(? p2) \wedge hasBeginPoint(? t, ? p1) \wedge hasEndPoint(? t, ? p2) \wedge hasCourse(? p1, ? c1) \wedge hasCourse(? p2, ? c2) \wedge swrlb:lessThan(? c1, ? c2) \rightarrow hasScenario(? s, TurnStarboardScenario)$	右转向场景
4	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge includes(? t, ? TrackSegment) \wedge sailing_in_anchorage(? TrackSegment) \wedge anchorage(? p) \wedge LA4(? TrackSegment, ? p) \rightarrow sailing_in_Anchorage(? s, ? p)$	驶入锚地的对象关系
5	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge sailing_in_anchorage(? TrackSegment) \wedge includes(? t, ? TrackSegment) \rightarrow hasBehavior(? s, sailing_in_anchorage)$	驶入锚地的行为
6	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge hasVelocity(? s, ? x) \wedge swrlb:lessThanOrEqual(? x, 0.5) \wedge anchorage(? p) \wedge hasTopIn(? s, ? p) \rightarrow hasBehavior(? s, anchoring)$	锚泊行为
7	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge includes(? t, ? TrackSegment) \wedge sailing_out_anchorage(? TrackSegment) \wedge anchorage(? p) \wedge LA4(? TrackSegment, ? p) \rightarrow sailing_out_anchorage(? s, ? p)$	驶出锚地的对象关系
8	$ship(? s) \wedge track(? t) \wedge hasTrack(? s, ? t) \wedge sailing_out_anchorage(? TrackSegment) \wedge includes(? t, ? TrackSegment) \rightarrow hasBehavior(? s, sailing_out_anchorage)$	驶出锚地的行为
9	$ship(? s) \wedge near(? s, ? b) \wedge ship(? b) \wedge hasRelativeBeaing \in [-336.5^\circ, -185^\circ] \cup [-175^\circ, -22.5^\circ] \cup [22.5^\circ, 175^\circ] \cup [185^\circ, 336.5^\circ] (? s, ? b) \rightarrow CrossingScenario(? s, ? b)$	交叉会遇场景

在推理规则描述的基础上,利用推理机进行场景认知计算。图 10 为船舶 KUO TAI 在 16 个轨迹段中经历的 COLREGs 场景计算结果(即图中黄色区域部分)。根据轨迹段中船舶属性变化、船舶与环境关系变化、船舶关系变化、行为变化以及轨迹与行为的映射关系,可以计算得出船舶 KUO TAI 具有保向行驶、右转向、减速、驶入 2 号锚地、在锚地内锚泊、驶出锚地、加速、驶入东渡航道、驶出东渡航道、驶入主航道、在主航道内与他船形成交叉会遇局面等一系列场景。

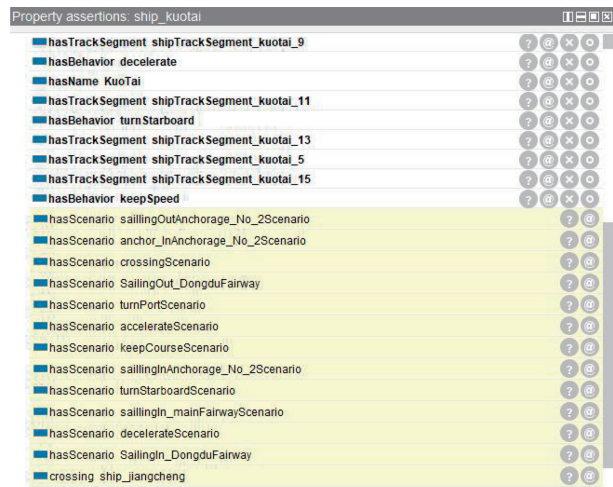


图 10 船舶 KUO TAI 所经历的场景计算结果

Fig. 10 Computational results of the scenarios experienced by the ship KUO TAI

为获取船舶 KUO TAI 在各个场景阶段的知识,按照推理规则对每个轨迹段所经历的场景进行计算。例如图 11 结果显示:船舶在 6 号轨迹段中具有减速右转、驶入主航道、与他船交叉相遇的行为场景。



图 11 船舶 KUO TAI 的 6 号轨迹段场景计算结果

Fig. 11 Computational results of the scenario for the ship KUO TAI's track segment No. 6

4.4 场景认知计算查询

认知计算所得到的场景知识可直接存储于计算机内部并可供下游任务使用,这些知识包含 COLREGs 文本中的显式和隐式的 COLREGs 场景。“KUO TAI”号船舶为例,其部分认知计算结果的查询示例如下:

1) 问题。在哪些轨迹段船舶 KUO TAI 发生了穿越航道事件? 穿越航道事件的发生地点? 开始时间? 结束时间?

2) 查询语句。

```

SELECT ? ship ? TrackSegment ? occurPlace ?
beginTime ? endTime ? passThroughFairwaySecnario
WHERE {
  Scenario: Ship hasSenario: TrackSegment ? Track
Segment
  ? Secnario rdf: type Scenario: passThroughFairway
Secnario
  ? TrackSegment hasSenario: secnario ? passThrough
FairwaySecnario
  ? TrackSegment Event: hasEvent: passThroughFairway
  ? TrackSegment hasSenario: reflectPlace ? occurPlace
  ? TrackSegment hasSenario: reflectBegin ? beginTime
  ? TrackSegment hasSenario: reflectEnd ? endTime}

```

3) 查询结果。结果显示船舶 KUO TAI 在第 5 条轨迹段的中,发生了 passThroughFairwaySecnario 事件,发生地点为 DongduFairway,起止时间分别为 2016/04/13 01:53 和 2016/04/13 02:21。

4) 查询结果分析。进一步探究船舶 KUO TAI 穿越东渡航道的场景,在该问题中既有属性行为中的移动,也有关系行为中的拓扑关系行为,是不同类型事件要素的组合。其触发特征在于船舶轨迹与东

渡航道的拓扑关系持续变化,具体体现在:最初拓扑关系行为由在东渡航道区域外,到与航道区域边界相交;进一步演变为拓扑行为是在航道区域内;最后拓扑关系行为再由在东渡航道区域内,到与航道区域边界相交,直至在东渡航道区域外。无论是驶入航道还是驶出航道均触发两个连续的原子事件,原子事件之间的关系为 follow。在航道区域内的属性行为是移动类型中的任意一种,不能为停留;船舶与航道内交通流的相对航向关系行为始终为接近正横,如图 12 所示。其可描述为

```

PassThroughFairwayEvent: =
AtomEvent: { < ae1, ..., aek > |
  { ae1: < relaB: outside → intersect_in > }
  { ae2: < relaB: intersect_in → inside > }
  { aek-1: < relaB: inside → intersect_out > }
  { aek: < relaB: intersect_out → outside > } }
Behavior: { < b1, b2, ..., bm > | ∀ bi, < relaB: right >,
  < relaB: inside > }
Process: { < p1, p2, ..., pm > | ∀ pi ≠ stop, i ∈ [1, m] }
Object: < ship, fairway >
Function: { before(ae1, aek-1), follow(aek-1, aek),
  trigger(ae1, CrossE), end(aek, CrossE) } (4)

```

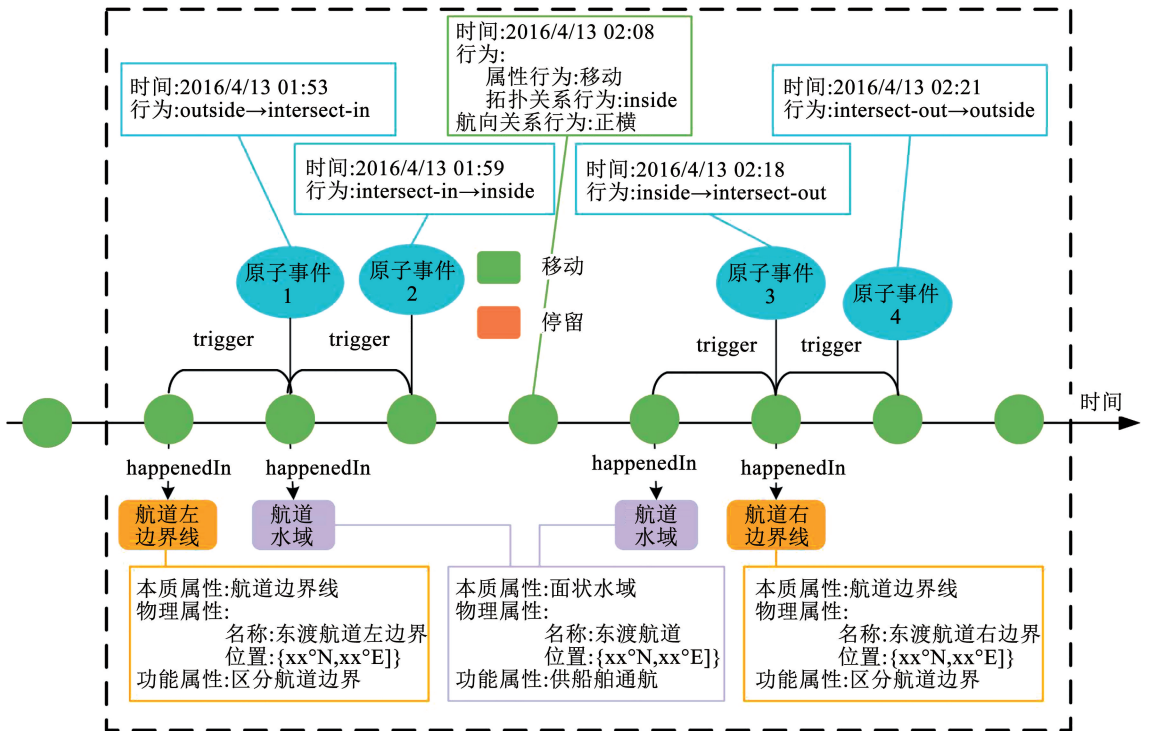


图 12 船舶 KUO TAI 穿越东渡航道事件的场景描述

Fig. 12 Scenario description of the event that ship KUO TAI pass through Dongdu Fairway

5 结 论

1) 剖析了 COLREGs 场景的定义、构成要素并

建立其概念模型。引入本体理论,定义场景认知中时间、对象、属性、关系、行为、事件等关键要素及其属性,对 COLREGs 场景概念模型进行结构化表达。

2) 提出了一种 COLREGs 场景认知计算框架和基于逻辑推理的场景认知计算方法,从而实现语义和规则约束下的场景认知计算。利用厦门港 AIS 数据进行 COLREGs 场景语义关联和复杂场景知识表达,根据推理机进行船舶行为的场景认知计算,从而获取相应的场景知识并可供语义查询。

3) 提出一种 COLREGs 场景知识认知模型和计算方法,相对于传统的数据驱动的计算船舶行为的方法,该模型能够对场景中的对象属性、对象间关系、船舶行为、交通事件等进行多尺度描述和语义计算,为判断 COLREGs 场景以及符合 COLREGs 的行为决策提供了新思路,而且对于促进 COLREGs 场景知识的标准化、共享利用有重要意义。下一步工作将关注实时的场景知识获取与规则建模的不确定性建模,实现对 COLREGs 场景的在线提取和实时识别。

致谢:课题组徐顺强与钟书彬同学提供了实验数据并进行处理,感谢他们对论文材料的贡献。

参考文献

- [1] 严新平, 吴超, 马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计[J]. 中国航海, 2017, 40(4): 95
YAN Xinping, WU Chao, MA Feng. Conceptual design of a "Navigation Brain" for cargo ships aimed at intelligent navigation[J]. Navigation of China, 2017, 40(4): 95
- [2] International Maritime Organization. Convention on the international regulations for preventing collisions at sea, 1972 (COLREGs) [M]. London: International Maritime Organization, 1972
- [3] 钟书彬. 基于 COLREGs 的场景知识建模与表达研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022
ZHONG Shubin. Research on scene knowledge modeling and expression based on COLREGs[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022
- [4] BAKDI A, VANEM E. Fullest COLREGs evaluation using fuzzy logic for collaborative decision-making analysis of autonomous ships in complex situations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 18433. DOI: 10.1109/ITITS.2022.3151826
- [5] 冯涂超, 郑茂, 尹奇志, 等. 基于海上避碰规则和机器学习的辅助避碰决策方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(1): 111
FENG Tuchao, ZHENG Mao, YIN Qizhi, et al. Research on assisted collision avoidance decision-making methods based on maritime collision avoidance rules and machine learning[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(1): 111
- [6] 周双林, 杨星, 刘克中, 等. 规则约束下基于深度强化学习的船舶避碰方法[J]. 中国航海, 2020, 43(3): 27
ZHOU Shuanglin, YANG Xing, LIU Kezhong, et al. Ship collision avoidance method based on deep reinforcement learning under rule constraints[J]. Navigation of China, 2020, 43(3): 27
- [7] 瞿栋, 彭艳, 蒲华燕, 等. 面向障碍速度不确定性的无人艇动态避碰[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(5): 655
QU Dong, PENG Yan, PU Huayan, et al. Dynamic collision avoidance for unmanned boats facing uncertainty in obstacle velocity [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2019, 25(5): 655
- [8] WANG S, ZHANG Y, ZHENG Y. Multi-ship encounter situation adaptive understanding by individual navigation intention inference [J]. Ocean Engineering, 2021, 237: 109612. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109612
- [9] HE Y, LIU X, ZHANG K, et al. Dynamic adaptive intelligent navigation decision-making method for multi-object situation in openwater[J]. Ocean Engineering, 2022, 253: 111238. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111238
- [10] 贺益雄, 李丽玲, 胡惟璇, 等. 开阔水域直航船自主避碰决策方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 67: 1
HE Yixiong, LI Liling, HU Weixuan, et al. Autonomous collision avoidance decision-making method for straight-sailing ships in open waters [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 67: 1
- [11] 狄伟. 基于 POA 和 COLREGs 的无人艇路径重规划方法[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(3): 1
DI Wei. Path re-planning method for unmanned boats based on POA and COLREGs[J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2019, 37(3): 1
- [12] XIAO Z, LU X, NING J, et al. COLREGs-compliant unmanned surface vehicles collision avoidance based on improved differential evolution algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: 121499. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121499
- [13] GAN L, YE B, HUANG Z, et al. Knowledge graph construction based on ship collision accident reports to improve maritime trafficsafety [J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 240: 106660. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106660
- [14] ZHONG S, WEN Y, HUANG Y, et al. Ontological ship behavior modeling based on COLREGs for knowledge reasoning[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(2): 203. DOI: 10.3390/jmse10020203
- [15] 文元桥, 张义萌, 黄亮, 等. 基于语义的船舶行为动态推理机制[J]. 中国航海, 2019, 42(3): 34
WEN Yuanqiao, ZHANG Yimeng, HUANG Liang, et al. Based on semantics dynamic reasoning mechanism of ship behavior [J]. Navigation of China, 2019, 42(3): 34
- [16] 文元桥, 宋荣鑫, 黄亮, 等. 船舶行为的语义建模与表达[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(8): 109
WEN Yuanqiao, SONG Rongxin, HUANG Liang, et al. Semantic modeling and expression of ship behavior [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(8): 109
- [17] AN L, ZHANG X, DING Z, et al. Research on ontology-based situation understanding and decision-making approach for MASS [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Ulsan: IOP Publishing, 2020, 929(1): 12
- [18] 丁志国, 张新宇, 王程博, 等. 基于驾驶实践的无人船智能避碰决策方法[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 96
DING Zhiguo, ZHANG Xinyu, WANG Chengbo, et al. Intelligent collision avoidance decision-making method for unmanned ships based on driving practice [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 96
- [19] 郭漩, 钱海忠, 王晓, 等. 多源道路智能选取的本体知识推理方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(2): 279
GUO Xuan, QIAN Haizhong, WANG Xiao, et al. Ontology knowledge reasoning method for multi-source road intelligent selection [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(2): 279