arXiv:2602.17242v1 [cs.LO] 19 Feb 2026

用于信息行为的 TAPO 结构化描述逻辑：过程性与基于谕示的扩展

Takao Inou´e

信息学部，大和大学，日本*

2026年2月19日

摘要

我们提出了*TAPO*结构化描述逻辑（TAPO–DL），这是一种经典描述逻辑的形式化扩展，旨在将信息行为建模为一种结构化的动态过程。

TAPO–DL 在标准 T 盒/A 盒架构的基础上扩展了两个额外层：过程盒 (P–Box)，它支持由概念驱动的命令式程序，例如条件动作和迭代动作；以及预言机盒 (O–Box)，它将与外部信息源的受控交互形式化。术语组件和断言组件刻画静态的概念知识与事实知识，而过程性组件和基于谕示的组件则能够显式表示信息生成动作和外部验证。

我们基于共生成层论解释，为 TAPO–DL 提供了统一的语义框架。在这一解释中，局部信息状态被建模为截面，而信息稳定性对应于相干全局结构的存在。在这一框架下，信息真理被刻画为在重复的主体交互下保持稳定，而非与某个固定的全局状态相对应。

通过整合描述逻辑、过程动态、基于谕示的推理和层论语义，TAPO–DL 为分析涉及交互、不确定性和情境性的上下文中的信息行为提供了一个有原则的形式化框架。

*电子邮箱：inoue.takao@yamato-u.ac.jp；个人邮箱：takaoapple@gmail.com[通信时我更希望使用个人邮箱地址。
]

关键词：信息行为、描述逻辑、TAPO结构化描述逻辑、过程性语义、基于谕示的推理、层论语义、知识表示。

MSC2020：03B45、68T27、18F20。

目录

1 引言 **2**

2 签名与概念语言 3

3 TBox 与 A–Box 33.1 TBox（概念公理）.3 3.2 A–Box（上下文断言）.3

4 作为层语义的上下文 4

5 P–Box：一种最小命令式语言 **4**
5.1 知识状态.4 5.2 守卫.4 5.3 程序语法.4 5.4 操作语义（大步）.5

6 O–Box：预言机交互规则 **6**

7 信息行为的一个应用 **7**
7.1 信息的本体论解释.7 7.2 信息行为作为共生成过程.7 7.3 稳定性与信息真理.7 7.4 最小示例.8

8 信息行为的层论解释 **8**
8.1 信息域作为位点.8 8.2 认知主体作为截面生成结构.8 8.3 层条件与信息一致性.8 8.4 显现作为稳定化的整体截面.9 8.5 最小示例：分布式感知.9

9 结论与未来工作 9

1 引言

经典描述逻辑（DLs）将知识组织为 TBox（概念公理）和 A–Box（个体断言）。这种架构非常适合表示静态知识,

但无法直接建模信息行为的关键现象：迭代搜索、基于部分信息的条件动作，以及与外部资源的受控交互。

本文介绍 TAPO结构化描述逻辑（简称 $TAPO\text{–}DL$），它在标准 T/A–Box 结构的基础上扩展了两个额外组件：

- 一个 $P\text{–}Box$，它不是一组推理规则，而是一个可编程层，可在其中使用命令式构造（例如 if–then 和 while）编写由概念驱动的过程；
- 一个 $O\text{–}Box$，用于规定允许的谕示交互，系统可通过这些交互纳入从外部获取的信息。

这四个组件——术语性、断言性、过程性和基于谕示——通过一种关于语境信息的层理论语义整合在一起。

2 签名与概念语言

设签名为

$$\Sigma = (N_C, N_R, N_I, \mathcal{U}),$$

其中， N_C 是概念名的集合， N_R 是角色名的集合， N_I 是个体名的集合， $\mathcal{U}$ 是语境域（开集、情境或信息状态）的集合。

概念表达式由标准 ALC语法生成：

$$C ::= \top \mid \bot \mid A \mid C \sqcap D \mid C \sqcup D \mid \neg C \mid \exists r.C \mid \forall r.C,$$

其中 $A \in N_C$ 且 $r \in N_R$。

3 TBox 和 A–Box

3.1 TBox（概念公理）

TBox T 是由概念包含构成的有限集合

$$C \sqsubseteq D.$$

这些公理在全局范围内进行解释，并且独立于上下文标注。

3.2 A–Box（上下文断言）

A–Box A 由以下形式的断言组成

$$a : C@U \qquad (U \in \mathcal{U}),$$

（以及角色断言（$a,\ b$）： $r@U$）。标注 @U 表示该断言相对于上下文域成立 U。直观而言， $C@U$ 表示将概念 C 局部化到 U中可获得的信息。

4 作为层语义的上下文

我们将上下文解释为位点的对象（或者，为简单起见，解释为拓扑空间的开集）。概念被解释为偏序集（$\mathcal{U}$，$\subseteq$）上的层。

对于每个概念 C 和上下文 U，解释 $C(U)$ 表示在 U中可用的信息下满足 C的个体集合。如果 $V \subseteq U$，则存在一个限制映射

$$\rho_{UV} : C(U) \to C(V),$$

从而确保上下文单调性：

$$a : C@U \Rightarrow a : C@V \quad (V \subseteq U).$$

5 P–Box：一种最小命令式语言

5.1 知识状态

一个知识状态是一个有序对

$$\Sigma = (\mathsf{T}, \mathsf{A}),$$

其中，T 是固定的 TBox，A 是当前的 A–Box。

5.2 守卫

守卫（条件）定义如下：

$$\varphi ::= \top \mid \bot \mid \alpha \mid \neg\varphi \mid (\varphi \wedge \varphi),$$

其中，原子守卫为

$$\alpha ::= a : C@U \mid (a, b) : r@U \mid (C \sqsubseteq D).$$

满足关系 $\Sigma \models \varphi$ 定义如下：

- $(\mathsf{T},\mathsf{A}) \models a : C@U$ 当且仅当 $a : C@U \in \mathsf{A}$；
- $(\mathsf{T},\mathsf{A}) \models (a, b) : r@U$ 当且仅当 $(a, b) : r@U \in \mathsf{A}$；
- $(\mathsf{T},\mathsf{A}) \models (C \sqsubseteq D)$ 当且仅当 $\mathsf{T} \vdash_{\mathrm{DL}} C \sqsubseteq D$；

其中布尔联结词按经典方式解释。

5.3 程序语法

P–Box语言 $\mathbf{P}_0$ 由以下方式生成的程序组成

$$P ::= \mathbf{skip} \mid \mathbf{add}\ \beta \mid \mathbf{del}\ \beta \mid P; P \mid \mathbf{if}\ \varphi\ \mathbf{then}\ P\ \mathbf{else}\ P \mid \mathbf{while}\ \varphi\ \mathbf{do}\ P,$$

其中 β遍历A–Box断言（要么是 $a : C@U$，要么是 $(a, b) : r@U$）。

5.4 操作语义（大步）

我们记

$$\langle P, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'$$

对于大步求值关系而言，核心规则是标准的。

基本命令。

$$\begin{gathered}\langle \mathbf{skip}, (\mathsf{T}, \mathsf{A})\rangle \Downarrow (\mathsf{T}, \mathsf{A}),\\ \langle \mathbf{add}\ \beta, (\mathsf{T}, \mathsf{A})\rangle \Downarrow (\mathsf{T}, \mathsf{A} \cup \{\beta\}),\\ \langle \mathbf{del}\ \beta, (\mathsf{T}, \mathsf{A})\rangle \Downarrow (\mathsf{T}, \mathsf{A} \setminus \{\beta\}).\end{gathered}$$

顺序复合。

$$\frac{\langle P_1, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma_1 \quad \langle P_2, \Sigma_1\rangle \Downarrow \Sigma_2}{\langle P_1; P_2, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma_2}$$

条件语句。

$$\frac{\Sigma \models \varphi \quad \langle P_1, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'}{\langle \mathbf{if}\ \varphi\ \mathbf{then}\ P_1\ \mathbf{else}\ P_2, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'} \qquad \frac{\Sigma \not\models \varphi \quad \langle P_2, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'}{\langle \mathbf{if}\ \varphi\ \mathbf{then}\ P_1\ \mathbf{else}\ P_2, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'}$$

第一条推理规则（左规则）的预期含义如下。

- 当前状态 Σ 满足条件 φ，即 $\Sigma \models \varphi$。
- 从状态 Σ 执行过程 P_1，求值得到结果状态 Σ'，记作 $\langle P_1,\ \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'$。

在这些假设下，条件语句的执行

如果 φ**那么** P_1 **否则** P_2

从状态 Σ 执行也求值得到状态 Σ'。在这种情况下，`else`分支 P_2 不会执行。

第二条推理规则（右规则）的预期含义如下。

- 当前状态 Σ 不满足条件 φ，即 $\Sigma \not\models \varphi$。
- 从状态 Σ 执行过程 P_2，求得结果状态 Σ'，记作 $\langle P_2,\ \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma'$。

在这些假设下，条件语句的执行

$$\mathbf{if}\ \varphi\ \mathbf{then}\ P_1\ \mathbf{else}\ P_2$$

从状态 Σ 求值为状态 Σ'。在这种情况下，`then` 分支 P_1 不会执行。

当。

$$\frac{\Sigma \not\models \varphi}{\langle \textbf{while } \varphi \textbf{ do } P, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma} \qquad \frac{\Sigma \models \varphi \quad \langle P, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma_1 \quad \langle \textbf{while } \varphi \textbf{ do } P, \Sigma_1\rangle \Downarrow \Sigma_2}{\langle \textbf{while } \varphi \textbf{ do } P, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma_2}$$

`while`构造的第一条推理规则旨在表达以下含义。

- 当前状态 Σ 不满足条件 φ，也就是说，$\Sigma \not\models \varphi$。

在这一假设下，循环的执行

$$\textbf{while } \varphi \textbf{ do } P$$

从状态 Σ出发会立即终止，并求值得到相同的状态 Σ。在这种情况下，不会执行循环体 P。

`while` 构造的第二条推理规则旨在表达以下含义。

- 当前状态 Σ 满足条件 φ，即 $\Sigma \models \varphi$。
- 从状态 Σ 执行循环体 P，求值得到中间状态 Σ_1，记作 $\langle P, \Sigma\rangle \Downarrow \Sigma_1$。
- 从更新后的状态 Σ_1 再次执行循环，求值得到最终状态 Σ'，记作 $\langle$**当** φ **执行** $P, \Sigma_1\rangle \Downarrow \Sigma'$。

在这些假设下，循环的执行

$$\textbf{当 } \varphi \textbf{ 执行 } P$$

从初始状态 Σ 求值得到状态 Σ'。

因此，while 构造通常是部分的（可能不会终止），这与迭代信息行为的开放性相符。

6 O–Box：谕示交互规则

O–Box 规定了与外部信息源（预言机）进行交互时允许采用的方式。预言机调用可以向 A–Box 中引入新的上下文断言，体现系统对环境的开放性。

形式上，O–Box 可以被视为一种关系

$$[\![\mathsf{O}]\!] \subseteq (\mathsf{T} \times \mathsf{A}) \times (\mathsf{T} \times \mathsf{A}),$$

其状态转换由外部依据（例如 API 响应、人工判断或传感器读数）提供正当性，而非在内部推导得出。

7 信息行为的应用

本节将介绍共生成本体论框架在信息行为分析中的一个简单应用。这里，信息行为 指认知主体从潜在信息域中选择、解释并稳定信息实体的一系列结构化行动。

7.1 信息的本体论解释

在当前的公理化中，信息实体并不被假定为先验存在的、完全确定的对象先验地。相反，它们被视为结构潜能域中的元素，并通过与认知主体的交互而显现。

设 $\mathcal{P}$ 表示结构潜能域， $\mathcal{E}$ 表示认知主体类， $\mathcal{M}$表示显现存在者域，如前文各节所述。信息对象 i 最初作为潜在结构属于 $\mathcal{P}$ ，例如未解释信号、数据流或符号模式。

7.2 信息行为作为共生成过程

信息行为被建模为一种共生成交互

$$(e, i) \longmapsto m,$$

其中， $e \in \mathcal{E}$ 是认知主体， $i \in \mathcal{P}$ 是潜在信息结构， $m \in \mathcal{M}$ 是显现信息对象。

这一过程并非只是揭示已有信息，而是主动将信息对象构建为对主体有意义的对象。不同的主体，或同一主体的不同内部状态，可能从同一潜在结构中生成不同的显现信息对象。

备注。这种解释与以下观点一致：信息在本体论上并非原始存在，而是通过结构化互动涌现。同一数据对一个主体而言可能在信息层面并不存在，却可能对另一个主体成为稳定的信息实体。

关于作者的共生成存在理论，请参阅 Inou´e [8]。

7.3 稳定性与信息真理

根据共生成公理，真理被解释为一种稳定性现象。在信息行为的上下文中，如果主体 e 与 i之间的重复互动能够持续再生成 m，则称信息对象 $m \in \mathcal{M}$ 具有信息稳定性。

这种稳定性对应于主体将信息识别为可靠、有意义或真实。这使得信息真理可以是主体相对的，而不会沦为任意性，因为稳定性受到 $\mathcal{P}$结构的约束。

7.4 最小示例

作为最小示例，考虑一个充当认知主体的传感器系统。原始传感器信号最初作为潜在结构存在于 $\mathcal{P}$中。通过主体实施的解释协议，某些信号模式被反复稳定为特定的信息对象，例如“检测到障碍物”或“温度超过阈值”。

在当前框架中，这些信息对象之所以存在，恰恰是因为它们通过主体—结构交互被共同生成地稳定下来。

8 信息行为的层论解释

在本节中，我们通过明确运用层论结构，强化对信息行为的解释。核心主张是：信息行为可自然地建模为局部截面的生成与稳定，以及它们被连贯地粘合为全局信息实体。

8.1 信息域作为位点

设 $(\mathcal{C}, J)$ 为一个位点，其中 $\mathcal{C}$ 的对象表示信息语境（例如时间窗口、传感器模态、语言视角），而 J 是编码允许覆盖的格罗滕迪克拓扑。

我们将信息潜能解释为一个预层

$$\mathcal{I} : \mathcal{C}^{\mathrm{op}} \to \mathbf{Set},$$

其中，$\mathcal{I}(U)$ 是上下文 U 中可用的潜在信息结构集合。

8.2 认知主体作为截面生成结构

认知主体 $e \in \mathcal{E}$ 被建模为一种结构，它为每个上下文 $U \in \mathcal{C}$ 指定一个（可能不完整的）截面选择

$$s_U \in \mathcal{I}(U),$$

该选择受主体内部的解释约束限制。

因此，信息行为是主体从预层 $\mathcal{I}$ 中提取、细化或稳定局部截面的过程。

8.3 层条件与信息一致性

层条件发挥着核心的本体论作用。给定一个覆盖 $\{U_i \to U\} \in J$，一组局部信息截面 $\{s_{U_i} \in \mathcal{I}(U_i)\}$ 表示分布式信息行为。

如果这些截面在交叠区域上一致，就存在唯一的粘合方式

$$s_U \in \mathcal{I}(U),$$

我们将其解释为全局层面上涌现出一个连贯信息对象。

这一粘合操作恰好对应着从碎片化、依赖上下文的信息，转变为稳定且有意义的信息存在。

8.4 显现为稳定的全局截面

在共生成本体论中，显现的信息实体对应于 $\mathcal{I}$ 的全局稳定截面。也就是说，当且仅当某个信息对象是经粘合形成、且在进一步的上下文细化下仍保持稳定的截面时，它才存在于 $\mathcal{M}$ 中。

备注：这种解释说明了为何信息存在既非纯粹主观，也非纯粹客观。局部截面取决于主体和上下文，而全局一致性则受拓扑 J 的约束。

8.5 最简示例：分布式感知

考虑一个分布式传感器网络。每种传感器模态或时间片都定义一个上下文$U \in \mathcal{C}$，原始传感器读数则构成 $\mathcal{I}(U)$ 中的局部截面。

信息行为包括提取这些局部截面，并验证它们在交叠区域上的兼容性。当协调一致性得以实现时，就会涌现出一个全局截面，对应于诸如“存在障碍物”这样的信息对象。

在此框架中，信息真理被视为粘合后的截面在细化下的稳定性，而非与预先给定的全局状态相对应。

9 结论与未来工作

TAPO–DL 通过引入可编程的过程性程序层（P–Box）和显式的预言机交互（O–Box），将描述逻辑扩展到静态表示之外。

未来，我们希望以更具层论的方式发展 TAPO-DL（参见 Inou´e[9]）。

参考文献

[1] F. Baader 等，《描述逻辑手册》，剑桥大学出版社，2003年。

[2] T. D. Wilson，信息行为研究中的模型，《文献学杂志》，1999年。

[3] D. O. Case 和 L. M. Given，《寻找信息》，Emerald，2016年。

[4] C. C. Kuhlthau，搜索过程内部，JASIS，1991年。

[5] S. Mac Lane 和 I. Moerdijk，《几何与逻辑中的层》，施普林格，1992年。

[6] Takao Inou´e, 《某种描述逻辑中“谋杀犯包含于人类”的 TBox推导》 $T_2 \models$ 谋杀犯 $\sqsubseteq$人类，ResearchGate 预印本，2025年。
https://www.researchgate.net/publication/393475729[7] Takao Inou´e, 《论大脑作为数学流形：神经流形、层语义与莱布尼茨式和谐》，arXiv:2601.15320，2026年。
[8] Takao Inou´e, 《基于我提出的存在定义推导出的共生成存在理论》。即将出版。[9] Takao Inou´e, 《TAPO结构化描述逻辑讲义》。即将出版。（标题具有时效性。）[10] K. Kaneiwa, 《描述逻辑与Web本体语言》（日文），Ohm-sya，东京，2009年。[11] K. Kaneiwa, 《语义网与描述逻辑》（日文），PDF幻灯片，第46页。
http://www.sw.cei.uec.ac.jp/kaneiwa/SemWeb.pdf

Takao Inou´e 大和大学信息学部 日本大阪府吹田市片山町2-5-1，邮编564-0082 inoue.takao@yamato-u.ac.jp（工作邮箱）takaoapple@gmail.com（我更常使用个人邮箱）