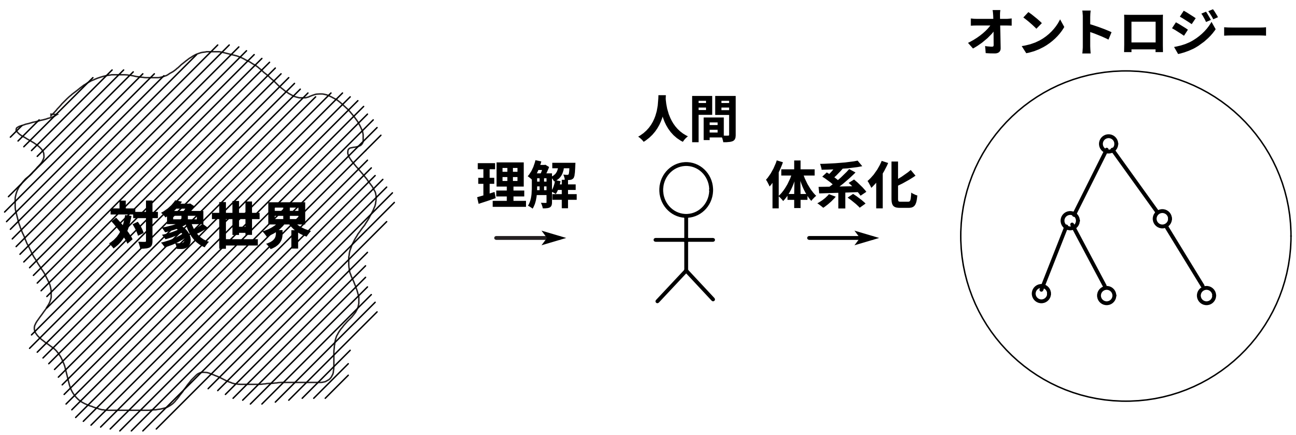
上位オントロジーによる知識表現と推論

兼岩 憲
国立情報学研究所(NII) 情報学基礎研究系
kaneiwa@nii.ac.jp

オントロジーの定義：

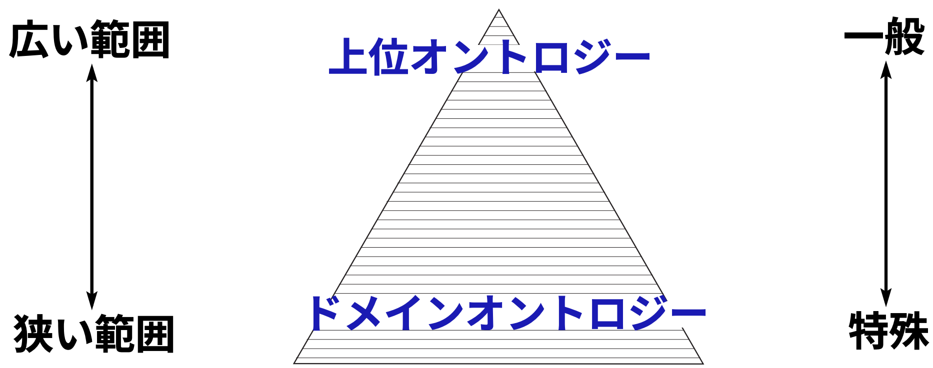
[溝口2004]によると，オントロジーとは「人間による対象世界への根本的な理解」であり，そして「それらを体系的に書き記したもの」である



哲学の立場「世の中に存在するすべてのものを体系立てて説明するもの」

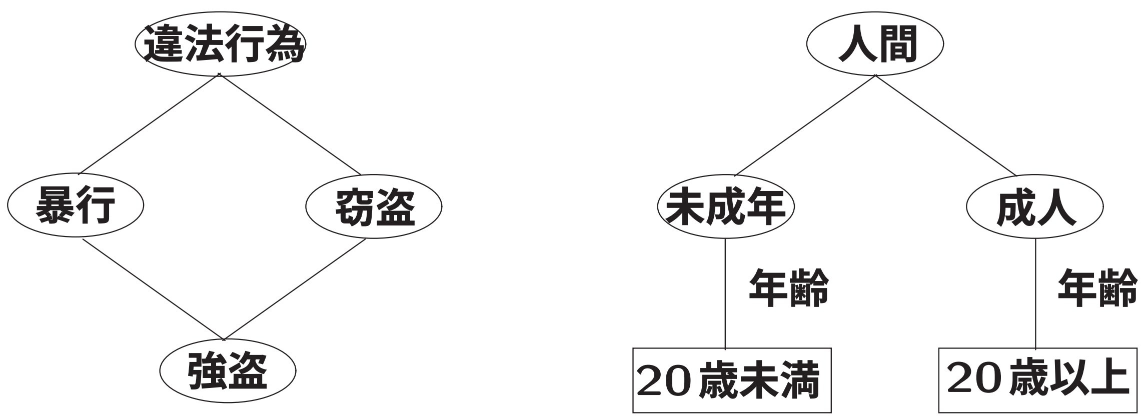
人工知能の立場「対象 (世界) において興味をもつ概念とそれらの間の関係を明示化したもの」

異なるオントロジーのレベル



■ ドメインオントロジー

- 特定の領域(ドメイン)を対象としたもの．例えば，法律オントロジー

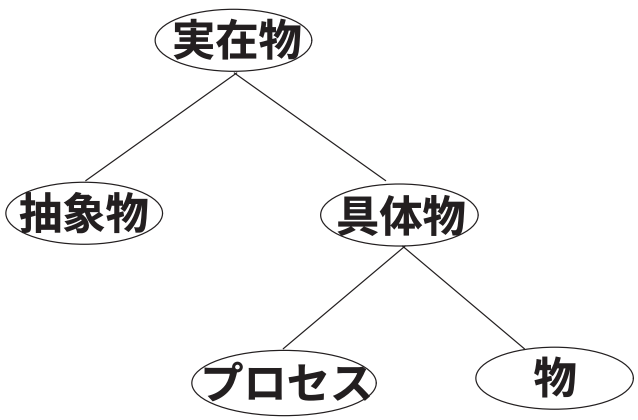


⇒ 専門的な知識の語彙定義が可能

■ 上位オントロジー[Niles01，Sowa00，Guarino97]

- **知識の一般的な特性を哲学的に規定したもの**

  例えば，実在する物とは何か？(抽象物や具体物に分類），知識の原理的な性質を分析



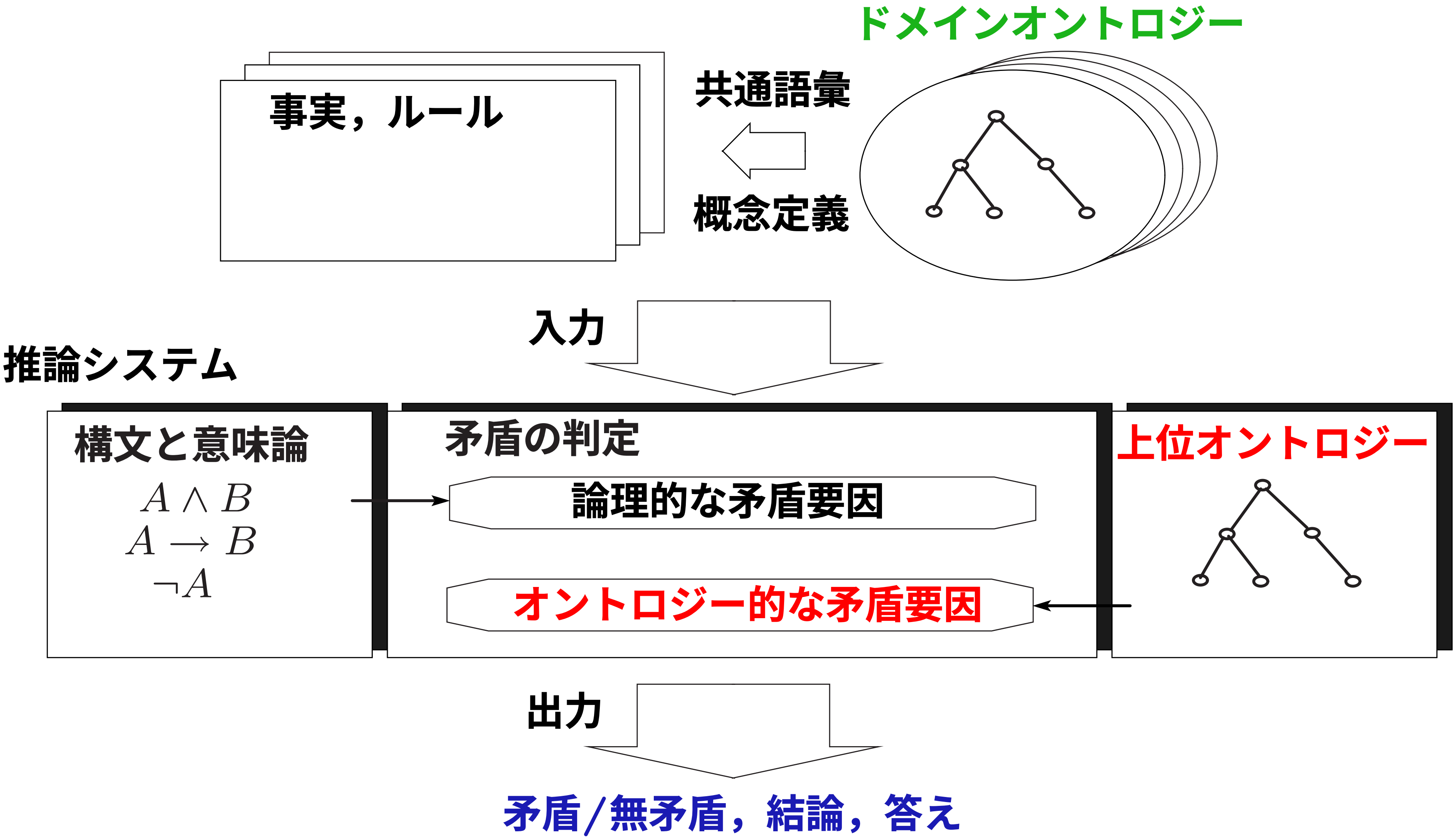
⇒ 知識表現と推論システムの基本仕様に利用可能

オントロジーへの期待

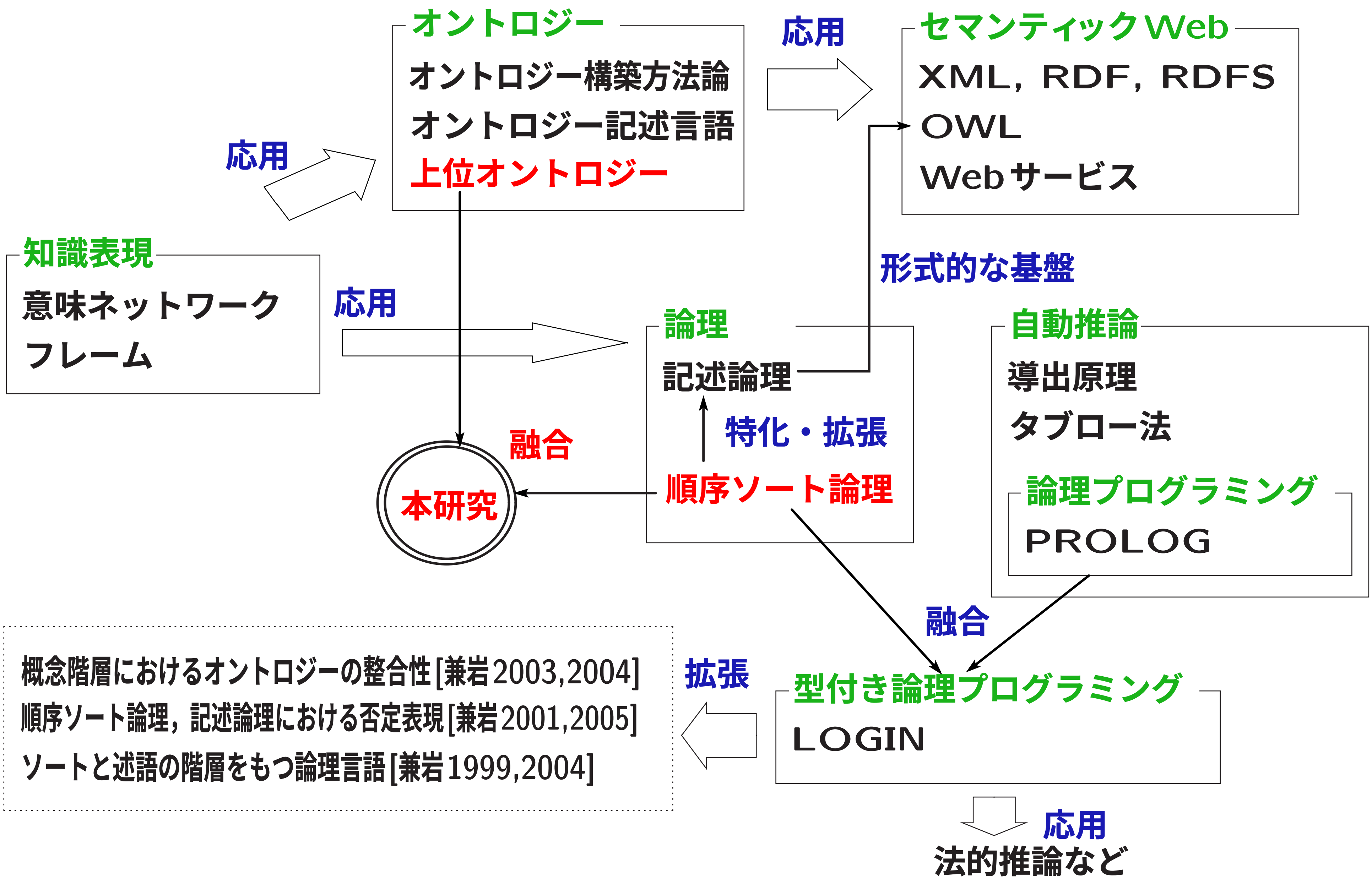
- セマンティックWeb
  - コンピュータによって高度なWeb処理を実現するために，メタデータ(例えば,「太郎」の年齢や住所など)やオントロジーが付与される

    ⇒ 意味検索，情報抽出(発見)，データ統合，知的エージェント
- 知識ベースへの応用
  - ドメインオントロジーに定義された共通の概念や語彙により，暗黙知識の明示化，知識の再利用および知識の共有などが可能になる
- オントロジー指向の論理体系 [科研・若手研究(B)，兼岩2002-2004]
  - 上位(形式)オントロジー研究で積み上げられた知識に対する哲学的な考察を論理体系に導入する

オントロジーはどうやって推論システムを強化する？



関連研究と位置づけ



オントロジー
オントロジー構築方法論
オントロジー記述言語
上位オントロジー
応用
セマンティックWeb
XML，RDF，RDFS
OWL
Webサービス
応用
知識表現
意味ネットワーク
フレーム
応用
形式的な基盤
論理
記述論理
特化・拡張
順序ソート論理
自動推論
導出原理
タブロー法
論理プログラミング
PROLOG
融合
本研究
融合
概念階層におけるオントロジーの整合性[兼岩2003,2004]
順序ソート論理，記述論理における否定表現[兼岩2001,2005]
ソートと述語の階層をもつ論理言語[兼岩1999,2004]
拡張
型付き論理プログラミング
LOGIN
応用
法的推論など

本アプローチの重要性

- オントロジーは，人間にとって妥当な知識表現や推論を規定するのに必要不可欠
  - 数学や哲学に基づいた文 (命題) 間の関係を体系化 $\Leftrightarrow$ 数理論理学，哲学論理学
  - 人間の理解に基づいた物や属性などの概念を体系化 $\Leftrightarrow$ オントロジー
- 上位オントロジーの研究成果が論理や推論の研究に十分生かされてない

(理由１) オントロジー研究者は論理の形式化に興味がない

(理由２) 記述論理や様相論理の研究者は知識の論理を形式化しているが，知識の哲学的考察には興味が薄いようだ

順序ソート論理とは？

順序ソート論理とは，複数のソートとその階層 (ソート階層) を備えた一階述語論理である．

ソート階層:

人間 $<$ **動物，鳥** $<$ **動物，男性** $<$ **人間，女性** $<$ **人間**

ソート項:

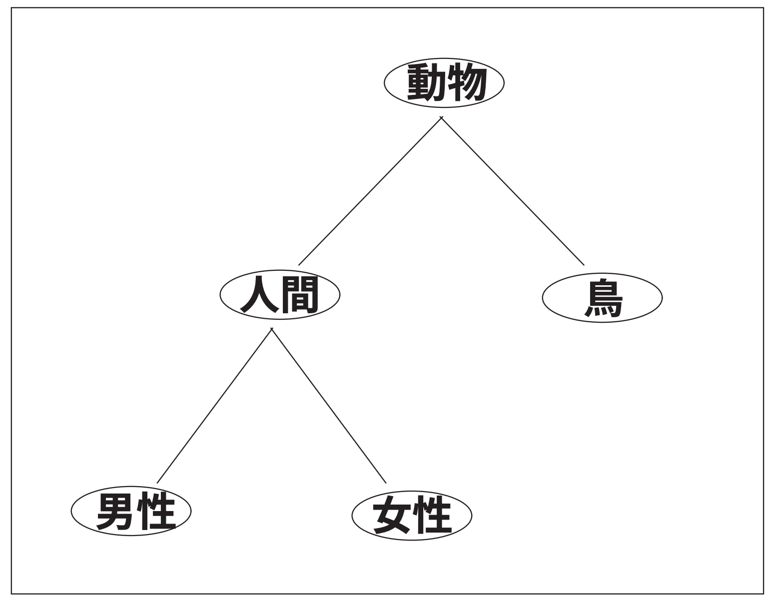
x: **人間，太郎**: **人間，父親** (x: **人間**): **人間**

ソート論理式: $p(t_1, \ldots, t_n)$, $A \wedge B$, $A \vee B$,
$\neg A$, $A \rightarrow B$, $(\forall x: s)A$, $(\exists x: s)A$

赤い (x: **リンゴ**)

ソート述語: $s(t)$

リンゴ (c: **果物**)



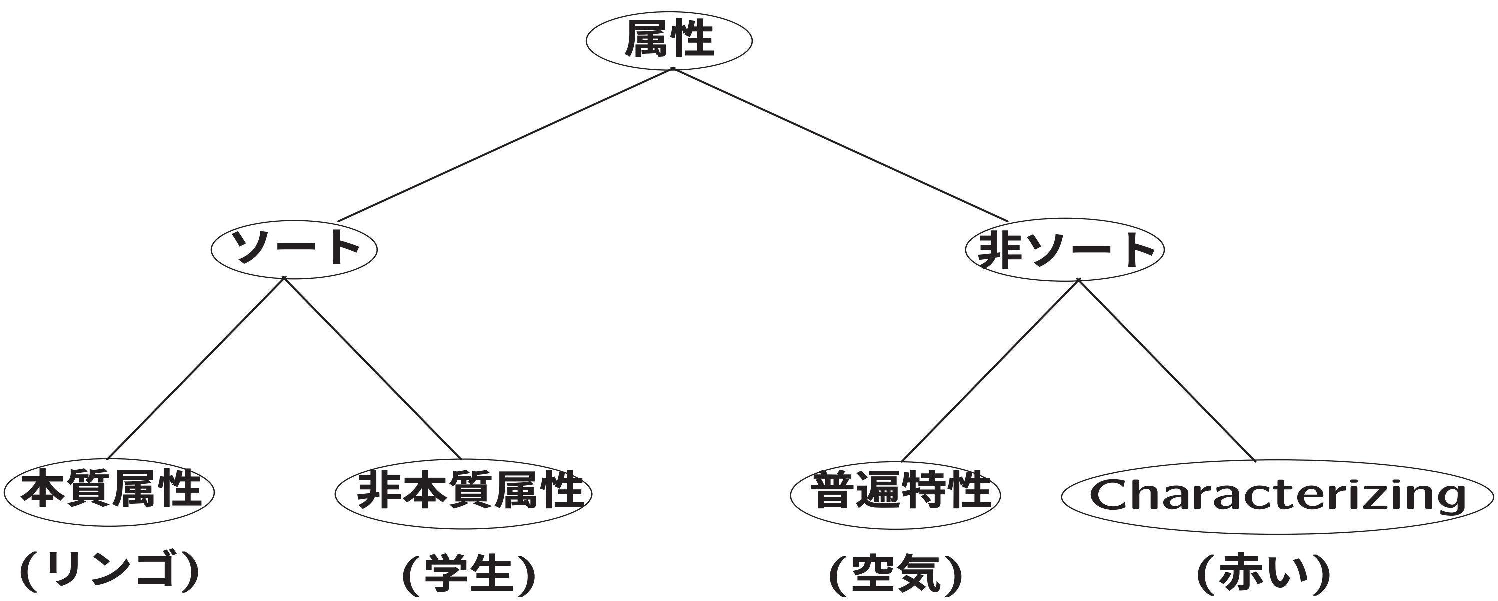
上位オントロジーとしての属性分類

クラス(オブジェクトの集まり)や物事の特徴を一般的に**属性**と呼ぶ.

属性:

- ソート: 実体の部分がその属性をもたない，かつidentityを認識できる
- 非ソート: 実体の部分がその属性をもつ

Example: 「人間」(人間の部分は人間ではない)はソートであり，「空気」(空気の部分は空気である)は非ソートである.



ソート:

- **本質属性**: ソートかつrigid(すべての実体は常にその属性をもつ)
- **非本質属性**: ソートかつ反rigid(すべての実体は時間や状況などに依存してその属性を失う)

Example: 「人間」は本質属性であり，「学生」は非本質属性である.

非ソート属性:

- 普遍特性: 非ソートかつrigid
- Characterizing: 非ソートかつ非rigid(rigidでない)

Example: 「空気」は普遍特性であり，「赤い」はCharacterizingである.

順序ソート論理と属性分類(上位オントロジー)

- 順序ソート論理においてソートと単項述語は意味論的に同一

  ソート定数: c: 果物 $\Leftrightarrow$ 果物(c)

  サブソート関係: 学生 $<$ 人間 $\Leftrightarrow$ 学生$(x) \rightarrow$ 人間(x)

$\Rightarrow$ 上位オントロジーでは，これらは異なった種類の属性として分類

順序ソート論理と属性分類(上位オントロジー)

- 順序ソート論理においてソートと単項述語は**意味論的に同一**
  ソート定数: c: 果物 $\Leftrightarrow$ 果物(c)
  サブソート関係: 学生 $<$ 人間 $\Leftrightarrow$ 学生$(x) \rightarrow$ 人間(x)

$\Rightarrow$ 上位オントロジーでは，これらは**異なった種類の属性**として分類

- 属性のrigidityにより，順序ソート論理には無意味な表現が存在

	インスタンス言明 c: s	適切な表現
本質属性	太郎: 人間	
非本質属性	太郎: 学生	学生(太郎)，x: 学生
非ソート属性	太郎: 幸せ	幸せ(太郎)

	包摂関係 $s < s'$	適切な表現
本質属性	人間 $<$ 動物	
非本質属性	学生 $<$ 人間	
非ソート属性	金持ち $<$ 幸せ	金持ち$(x) \rightarrow$ 幸せ(x)

$\Rightarrow$ rigidityの考えに基づいて，**インスタンス言明**と**包摂関係**の表現を扱うべき

Rigidityを導入した順序ソート論理

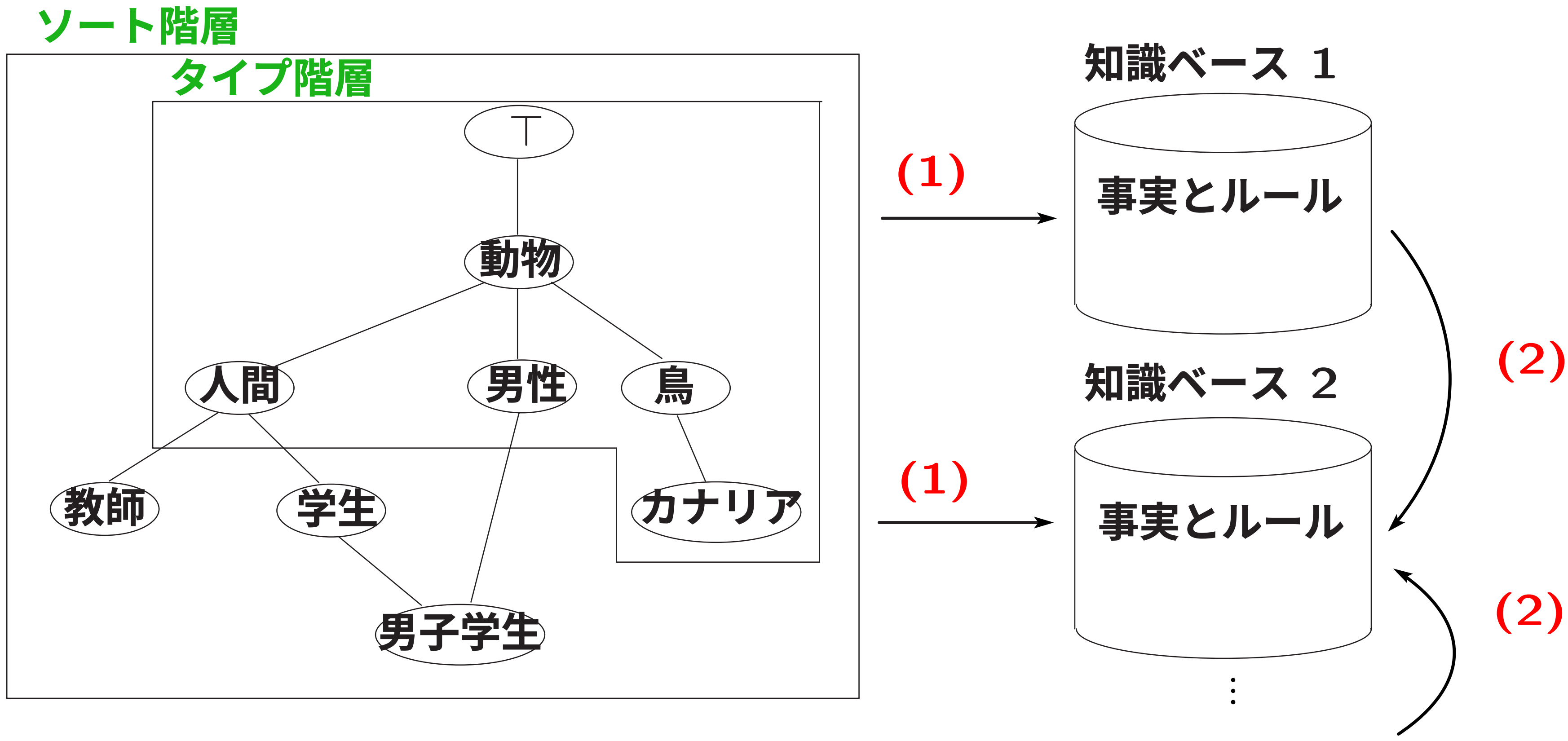
上位オントロジーの属性分類を用いて，ソート述語を含む順序ソート論理を拡張

属性	表現		インスタンス言明	包摂関係
本質属性	ソート s	タイプ τ	$\tau(t)$ rigid	すべての状況 $\tau_1 < \tau_2$
非本質属性		反rigidソート σ	$\sigma(t)$ 反rigid	$\sigma_1 < \tau_2$ $\sigma_1 < \sigma_2$
非ソート属性	単項述語 p		$p(t)$ 非rigid	ある状況 $p_1(x) \Rightarrow p_2(x)$

- 本質属性，非本質属性と非ソート属性は，それぞれタイプ τ，反rigidソート σ と単項述語 pによって表現される．
- タイプと反rigidソートは概念階層を構築するが，単項述語は概念階層を構築しない．

本質属性に関する知識ベース推論

概念階層と複数の知識ベースにおける推論



⇒ (1) ソート付きホーン節計算 ＋ (2) 本質属性の導出

本質属性の導出

本質属性の導出のために，知識ベースの拡張を定義する．ここで，$\mathcal{S} = \{\mathcal{K}_1, \ldots, \mathcal{K}_n\}$ を知識ベースの有限集合とする．

定義 $\mathcal{S}$ の各知識ベース $\mathcal{K}_i$ の拡張 $\mathcal{K}_i^m$ は次のように定義される．

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_i^0 &= \mathcal{K}_i \\ \mathcal{K}_i^{m+1} &= \mathcal{K}_i^m \cup \Delta(Th(\mathcal{K}_1^m) \cup \cdots \cup Th(\mathcal{K}_n^m)) \end{aligned}$$

但し，$Th(\mathcal{K}) = \{L \in \mathcal{A}_0 \mid \mathcal{K} \vdash L\}$，$\Delta(X) = \{\tau(t) \in \mathcal{A}_0 \mid \tau \in T \wedge \tau(t) \in X\}$，$\mathcal{A}_0$ は基礎アトムの集合，T はタイプの集合である．

定義 ($\mathcal{S}$ 上の本質属性の導出)

$\mathcal{K}_i^m \vdash L$ であるような知識ベース $\mathcal{K}_i$ の拡張 $\mathcal{K}_i^m$ が存在するならば，基礎アトム L は $\mathcal{S}$ 内の $\mathcal{K}_i$ から導出可能であるという ($\mathcal{K}_i \vdash_{\mathcal{S}} L$ で表す)．

複数の知識ベース上の推論

$\mathcal{K}_1$:

a) 男子学生(太郎 : 人間) $\leftarrow$
b) 優秀(太郎 : 人間) $\leftarrow$
c) 奨学生(x : 学生) $\leftarrow$ {優秀(x : 学生)}

$\mathcal{K}_2$:

a) 教師(花子 : 人間) $\leftarrow$
b) 好き(花子 : 人間, x : 学生) $\leftarrow$
c) 好き(花子 : 人間, x : 鳥) $\leftarrow$

$\mathcal{K}_3$:

a) カナリア(次郎 : 動物) $\leftarrow$
b) 飛べる(x : 動物) $\leftarrow$ {鳥(x : 動物)}

$\mathcal{K}_4$:

a) 父親(一郎 : 動物, 次郎 : 動物) $\leftarrow$
b) 鳥(y : 動物) $\leftarrow$ {父親(y : 動物, x : 動物), 鳥(x : 動物)}

例．本質属性の導出過程

Step 1: 知識ベース $\mathcal{K}_1^0, \mathcal{K}_2^0, \mathcal{K}_3^0, \mathcal{K}_4^0$

$$\mathcal{K}_i^0 = \mathcal{K}_i \ \ (1 \le i \le 4)$$

Step 2: 各知識ベース $\mathcal{K}_i^0$ **は，** $\mathcal{K}_i^1$ **へ拡張される．**

$$\mathcal{K}_i^1 = \mathcal{K}_i^0 \cup \Delta(T^0) \ \ (1 \le i \le 4)$$

$$T^0 = Th(\mathcal{K}_1) \cup Th(\mathcal{K}_2) \cup Th(\mathcal{K}_3) \cup Th(\mathcal{K}_4)$$

$\Delta(T^0) = \{$ **男性(太郎: 人間)**,
鳥(次郎: 動物), **カナリア(次郎: 動物)** $\}$

本質属性の導出

$\mathcal{K}_1$: **男性(太郎: 人間)**

$\mathcal{K}_2$:

$\mathcal{K}_3$: **鳥(次郎: 動物)**, **カナリア(次郎: 動物)**

$\mathcal{K}_4$:

Step 3: $\mathcal{K}_2^1$, $\mathcal{K}_4^1$ で，追加された rigid な論理式により新しい結論を導く．

$$Th(\mathcal{K}_1^1) = Th(\mathcal{K}_1) \cup \Delta(T^0)$$
$$Th(\mathcal{K}_2^1) = Th(\mathcal{K}_2) \cup \Delta(T^0) \cup \{\ \text{好き}(\text{花子}: \text{人間}, \text{次郎}: \text{動物})\ \}$$
$$Th(\mathcal{K}_3^1) = Th(\mathcal{K}_3) \cup \Delta(T^0)$$
$$Th(\mathcal{K}_4^1) = Th(\mathcal{K}_4) \cup \Delta(T^0) \cup \{\ \text{鳥}(\text{一郎}: \text{動物})\ \}$$

Step 4: 各知識ベース $\mathcal{K}_i^1$ は，$\mathcal{K}_i^2$ へ拡張される．

$$\mathcal{K}_i^2 = \mathcal{K}_i^1 \cup \Delta(T^1) \ \ (1 \leq i \leq 4)$$
$$T^1 = Th(\mathcal{K}_1^1) \cup Th(\mathcal{K}_2^1) \cup Th(\mathcal{K}_3^1) \cup Th(\mathcal{K}_4^1)$$
$$\Delta(T^1) = \Delta(T^0) \cup \{\ \text{鳥}(\text{一郎}: \text{動物})\ \}$$

本質属性の導出

$\mathcal{K}_1$:

$\mathcal{K}_2$:

$\mathcal{K}_3$:

$\mathcal{K}_4$: 鳥 (一郎 : 動物)

Step 5: さらに，新しい結果が知識ベース $\mathcal{K}_i^2$ から導かれる．

$$Th(\mathcal{K}_1^2) = Th(\mathcal{K}_1^1) \cup \Delta(T^1)$$
$$Th(\mathcal{K}_2^2) = Th(\mathcal{K}_2^1) \cup \Delta(T^1) \cup \{\ \text{好き (花子 : 人間, 一郎 : 動物)}\ \}$$
$$Th(\mathcal{K}_3^2) = Th(\mathcal{K}_3^1) \cup \Delta(T^1) \cup \{\ \text{飛べる (一郎 : 動物)}\ \}$$
$$Th(\mathcal{K}_4^2) = Th(\mathcal{K}_4^1) \cup \Delta(T^1)$$

Step 6: 知識ベース $\mathcal{K}_i^2$ はこれ以上拡張できないので (即ち，$\Delta(T^2) = \Delta(T^1)$)，導出は停止する．

時間/状況/信念の依存性

非本質属性:

- 時間依存: 時間だけに依存する(もしくは本質的に時間で決まる)
- 状況依存: 状況には依存するが時間には依存しない
- 時間・状況依存: 時間にも状況にも依存する
- 信念依存: 人それぞれの信念によって決まる

Example 1: 赤ちゃん, 子供, 青年, 成人, 老人(時間依存)

$tm_1 \leftarrow$ 赤ちゃん(太郎) $\rightarrow tm_2 \leftarrow$ 子供(太郎) $\rightarrow tm_3 \leftarrow$ 青年(太郎) $\rightarrow tm_4 \leftarrow \cdots$

Example 2: 武器, 机(状況依存)

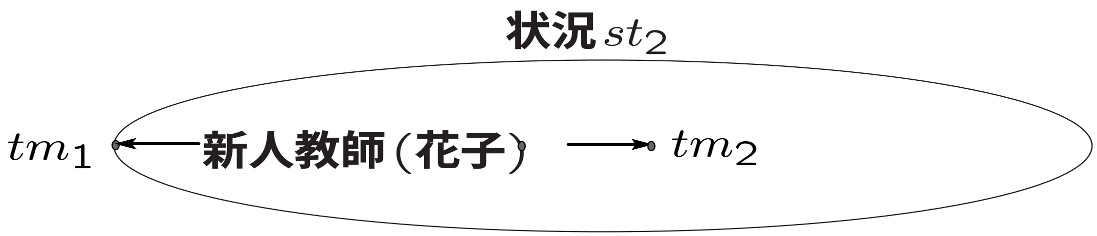
状況 st_1

武器(拳銃1)
武器(ナイフ1)

武器(拳銃1)
$\neg$武器(ナイフ1)

- タイプとしての武器：はじめからその役割をもつ
- 単項述語としての武器：後から役割をもち，そう呼ばれるもの

Example 3：新人教師 (時間・状況依存)



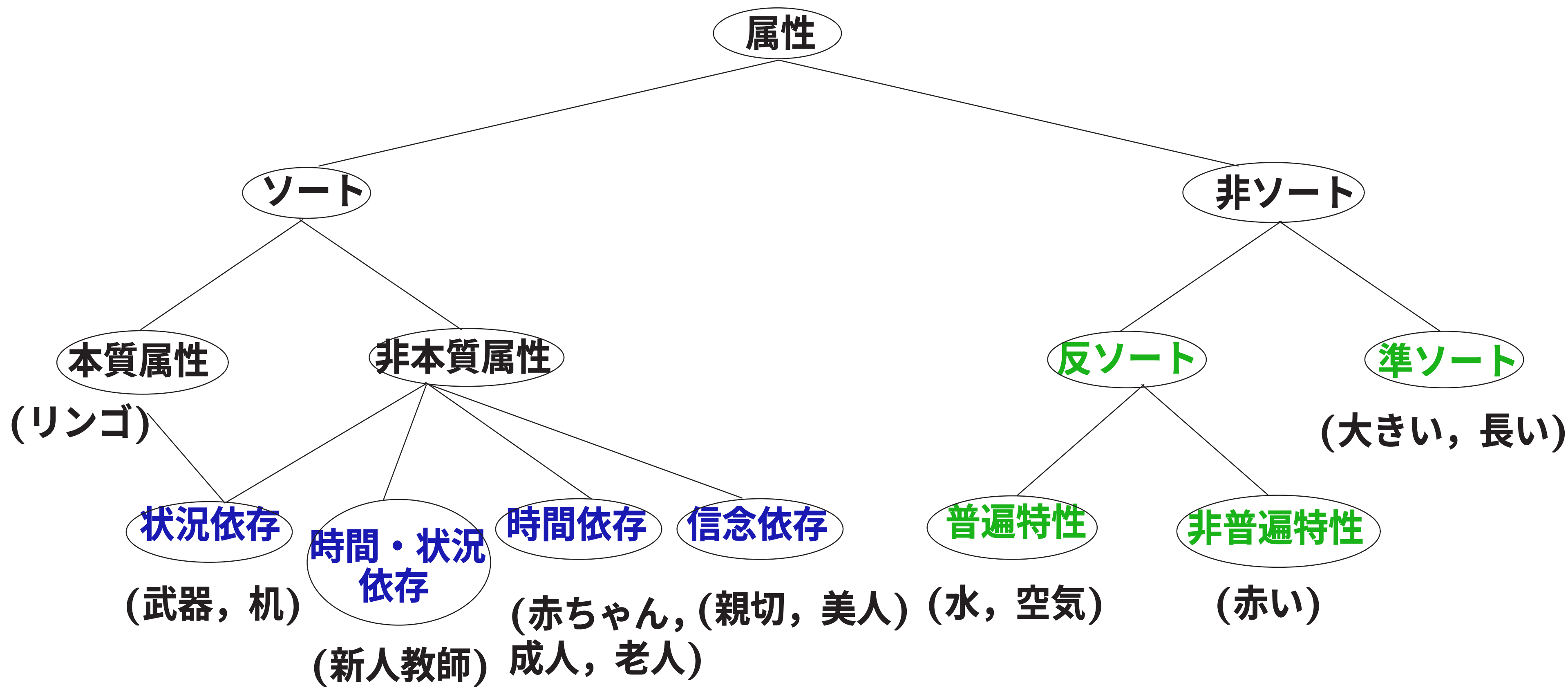
依存性の意味づけ

定義 (実体の存在を考慮した時間の依存性)

属性 s は

- 時間に依存しない，　すべての時間において，属性 s の実体が存在する限りその性質を保つとき
- 時間に依存する，　上記以外のとき

属性分類(上位オントロジー)の拡張



まとめ

- **オントロジーの概説**
  - 「人間による対象世界への根本的な理解」であり，そして「それらを体系的に書き記したもの」
  - ドメインオントロジーは特定の領域 (ドメイン) を対象としたものであり，上位オントロジーは知識の一般的な特性を哲学的に規定したものである．
  - 語彙や概念の定義，知識の特性を規定 $\Rightarrow$ 推論システムの強化

- **上位オントロジー (属性分類) の応用**

(1) 本質属性と非本質属性の区別を導入した順序ソート論理

$\Rightarrow$ 複数の知識ベースに関する推論を実現

(2) 非本質属性: 状況/時間/信念の依存性による分類

$\Rightarrow$ 実体の存在と様相を導入した順序ソート論理

$\Rightarrow$ 状況/時間の依存性からもたらされる属性の推論

今後の課題

- 高階表現や多相概念を用いたオントロジー記述言語
  - １つの語彙が複数の役割をもつ？
    - クラスとしての「人間」
    - 「動物種」のインスタンスとしての「人間」
- オントロジー言語ＯＷＬや記述論理への応用
  - 上位オントロジーをどうやってＯＷＬに用いるか
  - 実体の存在と様相を導入した記述論理(決定可能な言語クラス)

付録

実体の存在と様相を導入した順序ソート論理

$\blacksquare$（すべての世界），$\blacklozenge$（ある世界），$\Box_{\mathrm{Tim}}$（すべての時間），$\Diamond_{\mathrm{Tim}}$（ある時間），$\Box_{\mathrm{Sit}}$（すべての状況），$\Diamond_{\mathrm{Sit}}$（ある状況）

Example 1: $\blacksquare$男性(太郎: 人間)「存在する限り太郎は人間である」

Example 2: $\Diamond_{\mathrm{Tim}}$学生(太郎: 人間)「太郎はある期間だけ学生である」

公理 R_g:

本質属性: $(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \blacksquare\sigma(x\colon s))$

非本質属性: $(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \blacklozenge(\neg\sigma(x\colon s)))$

時間依存: $\Box_{\mathrm{Tim}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \Diamond_{\mathrm{Tim}}(\neg\sigma(x\colon s)))$

$\Box_{\mathrm{Tim}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \Box_{\mathrm{Sit}}\sigma(x\colon s))$

状況依存: $\Box_{\mathrm{Sit}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \Diamond_{\mathrm{Sit}}(\neg\sigma(x\colon s)))$

$\Box_{\mathrm{Sit}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \Box_{\mathrm{Tim}}\sigma(x\colon s))$

時間・状況依存: $\Box_{\mathrm{Sit}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to \Diamond_{\mathrm{Sit}}(\neg\sigma(x\colon s)))$

$\Box_{\mathrm{Sit}}(\forall x\colon s)(\sigma(x\colon s) \to (\Diamond_{\mathrm{Tim}}\sigma(x\colon s) \wedge \Diamond_{\mathrm{Tim}}\neg\sigma(x\colon s)))$

上位オントロジーによる推論

推論システム

様相順序ソート論理＋タブロー法の改良＋公理の追加

⇩ **恒真性を判定** $\vdash_{R_g} F$

(1) $\vdash_{R_g}$ **リンゴ**$(c:$ **果物**$) \rightarrow \blacksquare$**リンゴ**$(c:$ **果物**$)$

「cが果物であるならば，それが存在する限り果物である」

(2) $\vdash_{R_g} \Box_{\mathrm{Sit}}($**新人教師**$($**太郎**$:$ **人間**$)) \rightarrow (\Diamond_{\mathrm{Tim}}$**新人教師**$($**太郎**$:$ **人間**$) \wedge$
$\Diamond_{\mathrm{Tim}}\neg$**新人教師**$($**太郎**$:$ **人間**$))$

「状況に依存しないで，もし太郎が新人教師ならば，新人教師の期間とそうでない期間があるはずである」

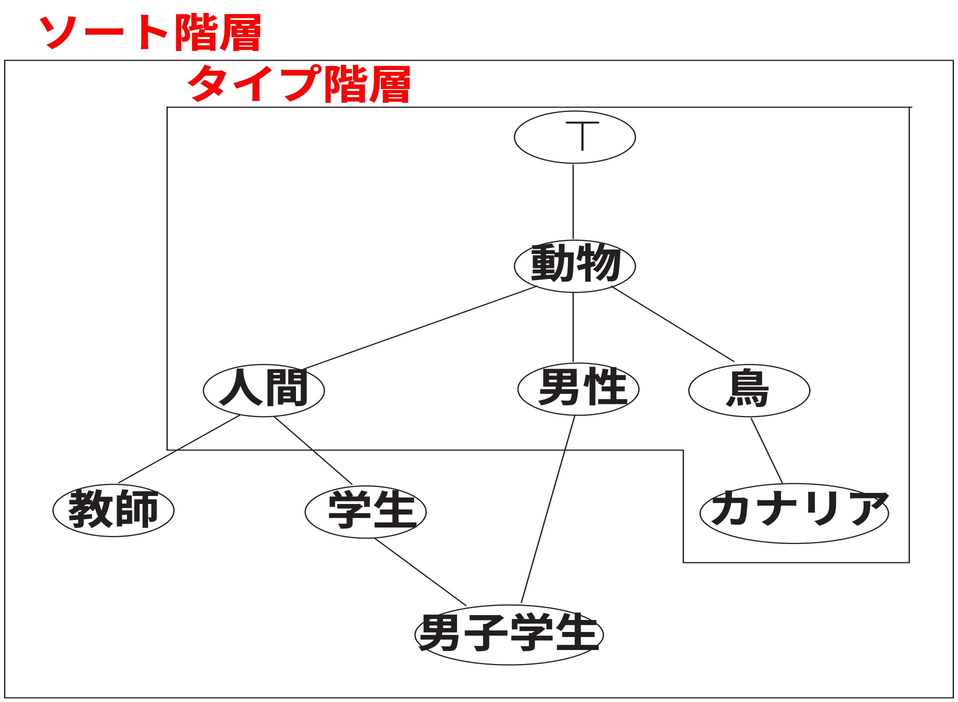
Talk Outline

1．オントロジーとは？–定義，レベル，期待，推論システムの強化
2．順序ソート論理とは？
3．上位オントロジーとしての属性分類
4．順序ソート論理と属性分類 (上位オントロジー) の融合
   - 本質属性に関する知識ベース推論
   - 時間/状況/信念と属性分類の拡張
5．まとめ
6．今後の課題

ソートシグネチャとRigidity

ソートシグネチャは，以下を満たすような組 $\Sigma = (T, S_A, \Omega, <, <_+)$ である．

- タイプ階層：タイプの集合とサブタイプ関係 $<$ の対 $(T, <)$
- ソート階層：ソートの集合とサブソート関係 $<_+$ 対 $(T \cup S_A, <_+)$ であり，以下を満たす．
  - サブソート関係は形式 $\tau <_+ \sigma$ を除く (即ち，$\sigma_i <_+ \sigma_j$，$\sigma <_+ \tau$ または $\tau_k <_+ \tau_l$)，
  - $\tau_i < \tau_j$ のとき，$\tau_i <_+ \tau_j$．



- **定数の宣言** $c\colon\ \to \tau \in \Omega$
- n**項関数の宣言** $f\colon \tau_1 \times \cdots \times \tau_n \to \tau \in \Omega$
- n**項述語の宣言** $p\colon s_1 \times \cdots \times s_n \in \Omega$
- **ソート述語の宣言** $p_s\colon s' \in \Omega$ **(但し，**$s < s'$**)**
- **非ソート述語の宣言** $p\colon undef \in \Omega$

定数とn**項関数の定義域および値域はタイプによって宣言される．**n **項述語の定義域はタイプまたは反rigidソートによって宣言される．**

Example 1: 太郎 $\in C$**，父親** $\in F_1$**，人間** $\in T$ **に対して，太郎**$\colon\ \to$ **人間 と父親**$\colon$ **人間** $\to$ **人間**

反rigidソートの定数と関数の例: 学生, 教師 $\in S_A$ **に対して，太郎**$\colon\ \to$ **学生 および父親**$\colon$ **人間** $\to$ **教師．しかし，ソート項「太郎**$\colon$ **学生」と「父親(太郎**$\colon$ **学生)**$\colon$ **教師」は適切でない．**

Example 2: 奨学生 $\in P_1$**，学生** $\in S_A$ **に対して，奨学生**$\colon$ **学生**

特に，ソート述語はその上位ソートによって宣言される．

Example 3: 空気 $\in P_1$**，学生** $\in S_A$ **に対して，空気**$\colon undef$ **と** $p_{\text{学生}}\colon$ **人間**

Rigidityを導入したソート項

タイプ項:

$$t_\tau \ ::= \ x\colon \tau \quad | \quad c\colon \tau \quad | \quad f(t_1,\ldots,t_n)\colon \tau \quad | \quad t_{\tau'}$$

但し，$c \in C$，$c\colon \ \to \tau \in \Omega$，$t_i$ はタイプ τ_i の項，$f \in F_n$，$f\colon \tau_1 \times \cdots \times \tau_n \to \tau \in \Omega$ かつ $\tau' < \tau$.

Example: 人間 $\in T$, および 太郎 $\colon \ \to$ 人間，父親 $\colon$ 人間 $\to$ 人間 $\in \Omega$ に対して，太郎 $\colon$ 人間 と 父親 (太郎 $\colon$ 人間) $\colon$ 人間

反 rigid ソート項:

$$t_\sigma \ ::= \ x\colon \sigma \quad | \quad t_{\sigma'}$$

但し，$\sigma' \leq \sigma$.

Example: 学生 $\in S_A$ に対して，$x\colon$ 学生 (太郎 $\colon$ 学生 は項とはならない)

ソート項:

$$t_s \ ::= \ t_\tau \quad | \quad t_\sigma \quad | \quad t_{s'}$$

但し，$s = \tau$，$s = \sigma$ または $s' < s$.

結果として，次の結論が$\mathcal{S}$内の各知識ベースから導出可能である．

$$\mathcal{K}_1 \vdash_{\mathcal{S}} \text{学生}(\text{太郎}:\text{人間})$$

$$\mathcal{K}_2 \not\vdash_{\mathcal{S}} \text{好き}(\text{花子}:\text{人間}, \text{太郎}:\text{人間})$$

$\mathcal{K}_2$は「学生(太郎: 人間)」を抽出できない．

$$\mathcal{K}_2 \vdash_{\mathcal{S}} \text{好き}(\text{花子}:\text{人間}, \text{次郎}:\text{動物})$$

(しかし，$\mathcal{K}_2 \not\vdash$ 好き(花子: 人間, 次郎: 動物))

$$\mathcal{K}_2 \vdash_{\mathcal{S}} \text{好き}(\text{花子}:\text{人間}, \text{一郎}:\text{動物})$$

(しかし，$\mathcal{K}_2 \not\vdash$ 好き(花子: 人間, 一郎: 動物))

$$\mathcal{K}_3 \vdash_{\mathcal{S}} \text{飛べる}(\text{一郎}:\text{動物})$$

(しかし，$\mathcal{K}_3 \not\vdash$ 飛べる(一郎: 動物))

本質属性「鳥(次郎: 動物)」と「鳥(一郎: 動物)」は，知識ベース$\mathcal{K}_2$，$\mathcal{K}_3$を拡張する．

$$\mathcal{K}_4 \vdash_{\mathcal{S}} \text{鳥}(\text{一郎}:\text{動物})$$

$$\mathcal{K}_3 \vdash_{\mathcal{S}} \text{鳥}(\text{次郎}:\text{動物})$$

ソート代入とソートなし代入

推論システムで反rigidソート項を扱うために，ソート代入とともにソートなし代入を導入する．

ソート代入

ソート代入は，$\theta(x\colon s) \in \mathcal{T}_s - \{x\colon s\}$ かつ $Dom(\theta)$ が有限であるような部分関数 $\theta\colon V \to \mathcal{T}$ である．

Example: $p(x\colon \text{動物})\{x\colon \text{動物}/\text{太郎}\colon \text{人間}\}$ (但し，人間 $<_+$ 動物)．

ソートなし代入

ソートなし代入は，$\theta^u(x\colon s) \in \mathcal{T} - \{x\colon s\}$ かつ $Dom(\theta^u)$ が有限であるような部分関数 $\theta^u\colon V \to \mathcal{T}$ である．

Example: $p(x\colon \text{学生})\{x\colon \text{学生}/\text{太郎}\colon \text{人間}\}$ (但し，人間 $\not<_+$ 学生)．

ソート付きホーン節計算

ソート付きホーン節計算をソート述語とソートなし代入に関する規則によって拡張する.

ホーン節: C_i

ファクト	$L \leftarrow$	$:= p(\vec{t}) \leftarrow$
ルール	$L \leftarrow G$	$:= p(\vec{t}) \leftarrow \{p_1(\vec{t_1}), \ldots, p_n(\vec{t_n})\}$

知識ベース: ホーン節の有限集合 $\mathcal{K} = \{C_1, \ldots, C_n\}$

ソート代入とカットの推論規則:

- **ソート代入規則:** $L \leftarrow G \in \mathcal{K}$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash (L \leftarrow G)\theta$
- **カット規則:** $\mathcal{K} \vdash L \leftarrow G$ **かつ** $\mathcal{K} \vdash L' \leftarrow G' \cup \{L\}$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash L' \leftarrow G \cup G'$

サブソートとソート述語に関する推論規則:

- **サブソート規則:** $\mathcal{K} \vdash s(t) \leftarrow G$ **かつ** $s <_{+} s'$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash s'(t) \leftarrow G$.
- **タイプ述語規則:** $sort(t) \leq_{+} \tau$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash \tau(t) \leftarrow$.

但し, $sort(t)$ **は項** t **のソートを示す.**

Example: $\mathcal{K} = \{$ **カナリア(次郎: 動物)** $\leftarrow \}$
カナリア $<_{+}$ **鳥, 鳥** $<_{+}$ **動物, 人間** $<_{+}$ **動物,**
次郎: $\rightarrow$ **動物, 太郎:** $\rightarrow$ **人間** $\in \Omega$

$$\frac{\text{カナリア(次郎: 動物)} \leftarrow}{\text{鳥(次郎: 動物)} \leftarrow}\ \text{(サブソート規則)}$$

$$\frac{}{\text{動物(太郎: 人間)} \leftarrow}\ \text{(タイプ述語規則)}$$

ソートなし代入の推論規則:

- **ソートなしのタイプ述語規則:** $sort(t) \leq_+ \tau$ **かつ** $\mathcal{K} \vdash s_1(t_1) \leftarrow G_1, \ldots,$ $\mathcal{K} \vdash s_n(t_n) \leftarrow G_n$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash \tau(t)\{x_1\colon s_1/t_1, \ldots, x_n\colon s_n/t_n\} \leftarrow G_1 \cup \cdots \cup G_n$ **(但し,** $EVar(t) = \{x_1\colon s_1, \ldots, x_n\colon s_n\}$**).**
- **ソートなしの代入規則:** $L \leftarrow G \in \mathcal{K}$ **,** $\mathcal{K} \vdash s_1(t_1) \leftarrow G_1, \ldots, \mathcal{K} \vdash s_n(t_n) \leftarrow G_n$ **のとき,** $\mathcal{K} \vdash (L \leftarrow G \cup G_1 \cup \cdots \cup G_n)\{x_1\colon s_1/t_1, \ldots, x_n\colon s_n/t_n\}\theta$ **(但し,** $\{x_1\colon s_1, \ldots, x_n\colon s_n\} \subseteq EVar(L \leftarrow G)$**).**

Example: $\mathcal{K} = \{$**学生**$($**太郎**$\colon$ **人間**$) \leftarrow,$
奨学生$(x\colon$ **学生**$) \leftarrow \{$**優秀**$(x\colon$ **学生**$)\}\}$
人間 $\in T$**,** **学生** $\in S_A$**,** **人間** $\not\leq_+$ **学生,**
奨学生$\colon$ **学生** $\in \Omega$**.**

$$\frac{\text{学生}(\text{太郎}\colon \text{人間}) \leftarrow \qquad \text{奨学生}(x\colon \text{学生}) \leftarrow \{\text{優秀}(x\colon \text{学生})\}}{\text{奨学生}(\text{太郎}\colon \text{人間}) \leftarrow \{\text{優秀}(\text{太郎}\colon \text{人間})\}}$$

但し,ソートなし代入 $\theta^u = \{x\colon$ **学生**$/$**太郎**$\colon$ **人間**$\}$**.**

例．本質属性の導出過程

ホーン節計算により，各知識ベース内で次の結論を導くことができる．

$$
\begin{aligned}
Th(\mathcal{K}_1) &= \Gamma \cup \{\ \text{優秀}(\text{太郎}:\ \text{人間}), \\
&\qquad\quad \text{奨学生}(\text{太郎}:\ \text{人間}), \\
&\qquad\quad \text{男子学生}(\text{太郎}:\ \text{人間}), \\
&\qquad\quad \text{学生}(\text{太郎}:\ \text{人間}), \\
&\qquad\quad \underline{\text{男性}(\text{太郎}:\ \text{人間})}\ \} \\
Th(\mathcal{K}_2) &= \Gamma \cup \{\ \text{教師}(\text{花子}:\ \text{人間})\ \} \\
Th(\mathcal{K}_3) &= \Gamma \cup \{\ \text{飛べる}(\text{次郎}:\ \text{動物}), \\
&\qquad\quad \underline{\text{鳥}(\text{次郎}:\ \text{動物}),} \\
&\qquad\quad \underline{\text{カナリア}(\text{次郎}:\ \text{動物})}\ \} \\
Th(\mathcal{K}_4) &= \Gamma \cup \{\ \text{父親}(\text{一郎}:\ \text{動物}, \text{次郎}:\ \text{動物})\ \}
\end{aligned}
$$

但し，

$$
\begin{aligned}
\Gamma = \{\ & \text{人間}(\text{太郎}:\ \text{人間}),\ \text{動物}(\text{太郎}:\ \text{人間}), \\
& \text{人間}(\text{花子}:\ \text{人間}),\ \text{動物}(\text{花子}:\ \text{人間}), \\
& \text{動物}(\text{次郎}:\ \text{動物}),\ \text{動物}(\text{一郎}:\ \text{動物})\ \}.
\end{aligned}
$$

属性の意味論

定義 (Σ-モデル) 以下を満たす組 $M = (W, U, I)$ である．

- W: 可能世界の集合
- U: 個体の全体集合
- $I = \{I_w \mid w \in W\}$: すべての可能世界 $w \in W$ の解釈関数 I_w の集合
  - $s \in T \cup S_A$ のとき，$I_w(s) \subseteq U$ (特に，$I_w(\top) = \bigcup_{s \in T \cup S_A} I_w(s)$)，
  - $s_i <_+ s_j$ のとき，$I_w(s_i) \subseteq I_w(s_j)$，
  - $c \in C$ かつ $c\colon \ \rightarrow \tau \in \Omega$ のとき，$I_w(c) \in I_w(\tau)$，
  - $f \in F_n$ かつ $f\colon \tau_1 \times \cdots \times \tau_n \rightarrow \tau \in \Omega$ のとき，$I_w(f)\colon I_w(\tau_1) \times \cdots \times I_w(\tau_n) \rightarrow I_w(\tau)$，
  - $p \in P_n$ かつ $p\colon s_1 \times \cdots \times s_n \in \Omega$ のとき，$I_w(p) \subseteq I_w(s_1) \times \cdots \times I_w(s_n)$，
  - $p \in P_1$ かつ $p\colon undef \in \Omega$ のとき，$I_w(p) \subseteq U$．

定義 (Rigid Σ-モデル) すべての可能世界 $w_i, w_j \in W$ に対して，$I_{w_i}(\tau) = I_{w_j}(\tau)$，$I_{w_i}(c) = I_{w_j}(c)$ かつ $I_{w_i}(f) = I_{w_j}(f)$ である．

定義 (Rigid Σ^+-モデル) すべての可能世界 $w \in W$ に対して，$I_w(s) = I_w(p_s)$ である．

Example:

タイプ階層: $\tau < \tau'$, **ソート 階層:** $\sigma <_{+} \sigma'$

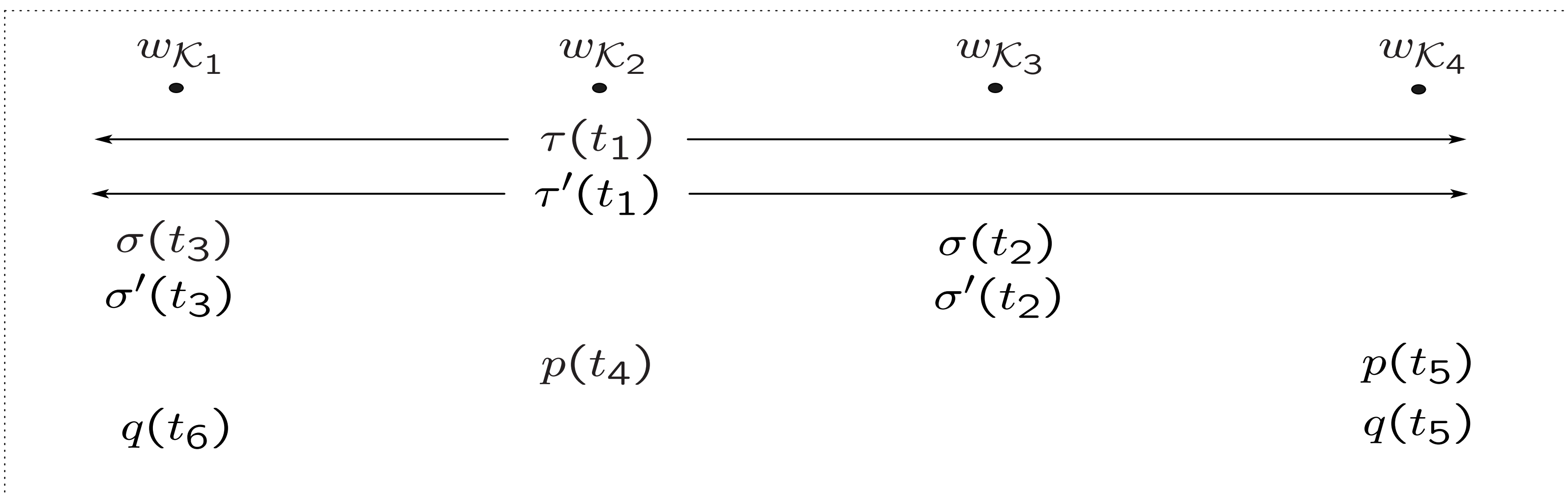
知識ベース: $\mathcal{K}_1 = \{\sigma(t_3) \leftarrow,\ q(t_6) \leftarrow\}$
$\mathcal{K}_2 = \{\tau(t_1) \leftarrow,\ p(t_4) \leftarrow\}$
$\mathcal{K}_3 = \{\sigma(t_2) \leftarrow\}$
$\mathcal{K}_4 = \{p(t_5) \leftarrow,\ p(x) \leftarrow \{q(x)\}\}$

RigidΣ-モデル:

タイプのrigidity: **すべての** $w_{\mathcal{K}_i}, w_{\mathcal{K}_j} \in W$ **に対して,** $I_{w_{\mathcal{K}_i}}(\tau) = I_{w_{\mathcal{K}_j}}(\tau)$

タイプおよび反rigidソートの包摂関係:
すべての $w_{\mathcal{K}_i} \in W$ **に対して,** $I_{w_{\mathcal{K}_i}}(\tau) \subseteq I_{w_{\mathcal{K}_i}}(\tau')$ **かつ** $I_{w_{\mathcal{K}_i}}(\sigma) \subseteq I_{w_{\mathcal{K}_i}}(\sigma')$

単項述語の包摂関係: $I_{w_{\mathcal{K}_1}}(p) \not\subseteq I_{w_{\mathcal{K}_1}}(q)$ **および** $I_{w_{\mathcal{K}_4}}(p) \subseteq I_{w_{\mathcal{K}_4}}(q)$



依存性の意味づけ

時間tm_iの集合 Tim，状況st_iの集合 Sit，信念b_iの集合Belを導入して，$Tim \cup Sit \cup Bel \subseteq W$とする．

定義 (時間の依存性) すべての時間$tm_i, tm_j \in Tim$に対して$I_{tm_i}(s) = I_{tm_j}(s)$であるとき，属性$s$は時間に依存しないという．そうでないとき，属性$s$は時間に依存するという．

定義 (実体の存在を考慮した時間の依存性) すべての時間$tm_i, tm_j \in Tim$に対して，$d \in U_{tm_i} \cap U_{tm_j}$のとき，$d \in I_{tm_i}(s) \Leftrightarrow d \in I_{tm_j}(s)$が成り立つならば，属性$s$は時間に依存しないという．そうでないとき，属性$s$は時間に依存するという．

Example: 太郎 $\in I_{tm_1,st_1}$(赤ちゃん)ならば，太郎 $\in U_{st_i}$である他のすべての状況st_iに対して，太郎 $\in I_{tm_1,st_i}$(赤ちゃん)が成り立つ．

さらに，状況や信念の依存性についても同様に定義される．