

心像意味論に基づく自然知能への接近 自然知能の演繹システムとしてのモデル化への挑戦 - An Approach to Natural Intelligence Based on Mental Image Directed Semantic Theory —Challenge for Natural Intelligence Modeling as a Deductive System—

横田 将生

Masao Yokota

福岡工業大学情報工学部

Faculty of Information Engineering, Fukuoka Institute of Technology

The author has proposed his original semantic theory “Mental Image Directed Semantic Theory (MIDST)” and has been challenging to model natural intelligence as a deductive system so as to facilitate intuitive but coherent human-robot interaction. This paper presents a brief sketch of the attempt on systematic representation and computation of subjective spatiotemporal knowledge in natural language based on certain hypotheses of mental image in human.

1. まえがき

筆者は、長年、心像意味論(Mental Image Directed Semantic Theory(略称 MIDST))と呼ぶ独自の自然言語意味論を展開しており、その中で自然言語表現が喚起する心像や感覚および動作に対応する心像を「属性空間の軌跡」と呼ぶ抽象線図形でモデル化し述語論理式として統一的に形式表現および計算する方法を提案している。この方法によれば、構造 非構造的データのもつ意味や意義を統合的に処理することが可能であり実際に、マルチメディア統合理解システム IMAGES-M に適用し、文章、図形、音声、ロボット動作、人間動作などの異種メディア表現間でシームレスな相互翻訳や質問応答などを試験的ではあるが実現している [Yokota 2005, 2006]。このシステムは人間・ロボット間の直観的相互作用(Intuitive Interaction)、すなわち、日常的な人間同士の相互作用と同等のものを実現することを目的としている [Yokota 2007a]。現在、筆者が挑戦している自然知能のモデル化は、さらに一歩進んで、直観的ではあるが整合的な相互作用(Coherent Interaction)を実現するために人間が持っている主観的な知識を演繹システムとして体系化しようとするものである。本稿では、人間における心像形成過程に関する仮説に基づき自然言語で表現される時空間に関する主観的知識の体系的表現と計算に関する試みについて述べる。

2. 時空間言語と心の機能モデル

自然言語の中でも時空間に関する部分言語は特に時空間言語(Spatiotemporal Language)と呼ばれ、人間の認知にかかわる基本的な問題(曖昧性、漠然性、同一性、時間性など)を含んでいることからオントロジーの研究などにおいて大きな注目を浴びている [Harding 2002]。その一方、従来、時空間言語理解に関する多くの研究は英語の前置詞に相当する比較的少数の語句を中心とする S1 のような事物間の静的位置関係に関する表現にその対象を限定している [Logan 1996]。しかしながら、時空間における事物間の関係表現、特に、動的なものは S2 に示すように大部分動詞を中心とするものであり、さらに S3 のように複雑な関係は前置詞(あるいは相当語句)中心では不可能である。

(S1) The book is *between* the cup and the bottle.

(S2) The robot *carries* the box, *avoiding* the obstacles.

(S3) The road *runs* 10km straight east from A to B and, after a while, at C it *meets* the street with the sidewalk.

ところで、時空間に関して一般人が頻繁に発話しかつ容易に理解する自然言語表現のなかには S4 ~ S8 に示すように一見非科学的ともとれるものが多く存在する。

(S4) The Andes Mountains run north and south.

(S5) The road sinks to the river.

(S6) The road rises from the river.

(S7) The roads meet at the city.

(S8) The roads separate at the city.

筆者は、このような表現には時空間における人間の主観(外界知覚過程の性向、すなわち、時空間に対する心の働き方)が投影されていると考え、図 1 に示すような人間の心のモデルとその機能に関する仮説に基づき時空間にかかわる人間の主観的知識を体系的に表現および計算するメカニズムをモデル化しようとしている。

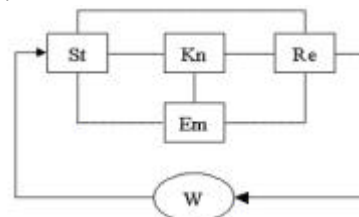


図 1 心の機能モデル (St:刺激受容系,Kn:知識処理系,Em:情動処理系,Re:反応処理系,W:環境世界)

この心のモデルは4個のエージェント(刺激受容系(St),知識処理系(Kn),情動処理系(Em),反応処理系(Re))よりなり、それらの協調系(すなわち、マルチエージェント[Minsky 1986])として人間自身の肉体を含む環境世界(W)からの刺激に対して反応する心のメカニズムを仮説的に実現するものである。

時空間言語の特徴は他の部分言語(Sublanguage)と異なり、その表現の意味が視覚的に外界事象と対応づけられる点にある。本研究では、図 1 に示す心のモデルを構成するエージェントのうち、刺激受容系(St)の能動的な外界知覚機能(Active Perception)に基づき主観的時空間関係知識が知識処理系(Kn)で形成され、やはり主観的ではあるが人間においては普遍性のあると思われる法則が抽出される過程をシミュレートし

れらを形式化することになる。具体的には、図 2 に示すような手順で、まず、与えられた時空間表現 (刺激表現) が想起させる外界事象 (指示対象) を属性空間の軌跡として抽象化し軌跡式として表現する。続いて、内容的に導出関係にある表現に対応する軌跡式の集合から主観的な法則を抽出する。例えば、図 3 は 'conveyance' を刺激表現とし、その指示事象が軌跡式として表現される過程を示したものである。

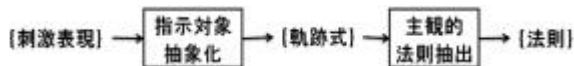


図 2 主観的知識形成と主観的法則抽出

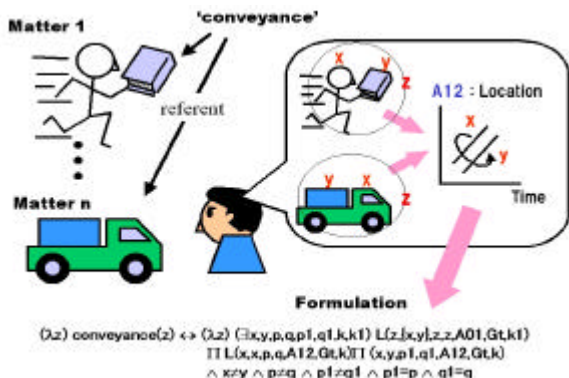


図 3 概念形成過程と軌跡式表現

主観的法則に関して、現在までに、発見されている重要なものの一つが、空間的事象の可逆性である。この法則は、たとえば、S5 と S6 および S7 と S8 はそれぞれ同一時間帯において同一の事象を指示するという事実から導かれた。すなわち、それぞれの表現対において、内容が相互に導出される関係、言語的にはパラフレーズ (言い換え) 関係にあることになる。このことは、心のモデルでは視線が指示対象を能動的に走査する時の方向の違いとしてとらえることになる [Yokota 2007a]。

3. 主観的知識の表現

軌跡式は属性空間における軌跡を論理式で表現したものであり、例えば、'fetch' という動詞概念の軌跡は図 4-a のように表現され、その軌跡式表現は式(1)のようになる。この式は 'x が自力で p₁ から p₂ に行き、x の作用で y が一緒に移動し p₁ に戻る' ことを意味し A₁₂ は "物理的位置" に関する属性空間である。この式において、L(...) は原子軌跡式と呼ばれ属性空間における最も単純な軌跡 (図 4-b) を表し、式(2)の場合は 'x の作用により y の属性 a の値が時間的あるいは空間的に(基準値 k に対する相対値 p から q に変化する)と解釈する。変項 g はその変化 (事象) が時間的か空間的かを示すパラメータであり、それぞれ、時間的事象及び空間的事象と呼ぶ。S9 および S10 はそれらの例であり、その内容は、式 (3) および (4) のように形式化される。また、∩ および ∙ はそれぞれ同時的連言 (SAND: Simultaneous AND) と継時的連言 (CAND: Consecutive AND) であり、相対的時間関係と論理的関係を同時に表現するための時間論理結合子と呼ばれるものに属している [Yokota 2007a]。

$$(\exists x,y,p_1,p_2,k)L(x,x,p_1,p_2,A_{12},G_t,k) \bullet$$

$$((L(x,x,p_2,p_1,A_{12},G_t,k) \cap L(x,y,p_2,p_1,A_{12},G_t,k)) \wedge x \neq y \wedge p_1 \neq p_2) \quad (1)$$

$$L(x,y,p,q,a,g,k) \quad (2)$$

(S9) The bus runs from Tokyo to Osaka.

(S10) The road runs from Tokyo to Osaka.

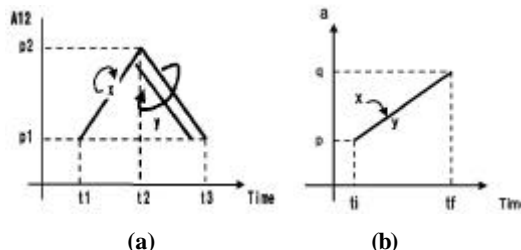


図 4 (a) 軌跡の例および (b) 原子軌跡

一般に、時間論理結合子は(3)で定義される。この式において、K_i は表 1 に示す相対的時間関係 τ_i を担う時間論理結合子、χ_i は軌跡式、K は通常の 2 項論理結合子 (∧, ∨, ⊃, ≡) を意味する。特に、軌跡の分節において最も頻繁に用いる同時的連言 ∧₀ と継時的連言 ∧₁ をそれぞれ ∩ と ∙ とで簡易表記する。

$$\chi_1 K_i \chi_2 \Leftrightarrow (\chi_1 K_i \chi_2) \wedge \tau_i(\chi_1, \chi_2), \quad (\tau_i(\chi_2, \chi_1) \equiv \tau_i(\chi_1, \chi_2)) \quad (3)$$

心像意味論では、時間的事象と空間的事象の違いは対象を観察する人間の視線などに対応する注意の焦点 (FAO: Focus of Attention of Observer) の走査様態の異なりとして説明される。たとえば、S9 でのバス移動に関する知覚は FAO がバスに置かれ共に移動することによって生じ、S10 での道路延伸に関する知覚は FAO のみが道路に沿って移動することによって生じると仮定する。この場合、これらの事象は FAO が置かれている事物 (属性担体 (AC: Attribute Carrier) と呼ぶ) の属性に関する時間的および空間的变化として原子軌跡でそれぞれ (4) および (5) のように分節記述されることになる。

$$(\exists x,y,k)L(x,y,Tokyo,Osaka,A_{12},G_t,k) \wedge bus(y) \quad (4)$$

$$(\exists x,y,k)L(x,y,Tokyo,Osaka,A_{12},G_s,k) \wedge road(y) \quad (5)$$

以上の作業仮説従うと S5 ~ S8 が指示する事象はそれぞれ (6) ~ (9) のように軌跡式で表現される。ただし、"A₁₃" は属性 "移動方向" を、"↓" および "↑" はそれぞれ値 "下方" および "上方" を意味する。

$$(\exists x,y,p,z,k_1,k_2)L(x,y,p,z,A_{12},G_s,k_1) \cap L(x,y,\downarrow,\uparrow,A_{13},G_s,k_2) \wedge road(y) \wedge river(z) \wedge p \neq z \quad (6)$$

$$(\exists x,y,p,z,k_1,k_2)L(_,y,z,p,A_{12},G_s,k_1) \cap L(_,y,\uparrow,\downarrow,A_{13},G_s,k_2) \wedge road(y) \wedge river(z) \wedge p \neq z \quad (7)$$

表 1 時間関係のリスト

Definition of τ _i	Allen's notation	
t ₁₁ =t ₂₁	τ ₀ (χ ₁ , χ ₂)	equals(χ ₁ , χ ₂)
∧ t ₁₂ =t ₂₂	τ ₀ (χ ₂ , χ ₁)	equals(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₂ <t ₂₁	τ ₁ (χ ₁ , χ ₂)	meets(χ ₁ , χ ₂)
	τ ₋₁ (χ ₂ , χ ₁)	met-by(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₁ =t ₂₁	τ ₂ (χ ₁ , χ ₂)	starts(χ ₁ , χ ₂)
∧ t ₁₂ <t ₂₂	τ ₋₂ (χ ₂ , χ ₁)	started-by(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₁ >t ₂₁	τ ₃ (χ ₁ , χ ₂)	during(χ ₁ , χ ₂)
∧ t ₁₂ <t ₂₂	τ ₋₃ (χ ₂ , χ ₁)	contains(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₁ >t ₂₁	τ ₄ (χ ₁ , χ ₂)	finishes(χ ₁ , χ ₂)
∧ t ₁₂ =t ₂₂	τ ₋₄ (χ ₂ , χ ₁)	finished-by(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₂ <t ₂₁	τ ₅ (χ ₁ , χ ₂)	before(χ ₁ , χ ₂)
	τ ₋₅ (χ ₂ , χ ₁)	after(χ ₂ , χ ₁)
t ₁₁ <t ₂₁ ∧ t ₂₁ <t ₁₂	τ ₆ (χ ₁ , χ ₂)	overlaps(χ ₁ , χ ₂)
∧ t ₁₂ <t ₂₂	τ ₋₆ (χ ₂ , χ ₁)	overlapped-by(χ ₂ , χ ₁)

† [t₁₁, t₁₂] と [t₂₁, t₂₂] はそれぞれ χ₁ と χ₂ の生起時間帯。

$$(\exists u,x,y,z,p,q,k)L(u,x,p,z,A_{12},G_s,k)\Pi L(u,y,q,z,A_{12},G_s,k) \wedge \text{road}(x) \wedge \text{road}(y) \wedge \text{city}(z) \wedge p \neq q \quad (8)$$

$$(\exists u,x,y,z,p,q,k)L(u,x,z,p,A_{12},G_s,k)\Pi L(u,y,z,q,A_{12},G_s,k) \wedge \text{road}(x) \wedge \text{road}(y) \wedge \text{city}(z) \wedge p \neq q \quad (9)$$

4. 主観的法則の抽出

時空間に関する主観的法則の抽出と形式化は時空間関係を指示する語句を含む典型的な例文を選択して内容的に導出される表現を可能な限り作成し、それらの間の時間論理的関係を演繹システムの公準(postulate)として採用することである。ここでは現在までに発見されているいくつかの公準について説明する。

4.1 空間的事象の可逆性に関する公準

たとえば、上述のように、S5 と S6、および、S7 と S8 はそれぞれ同一時間帯において同一の事象を指示しうるので互いに導出される関係にあり、(10)および(11)のようにそれぞれの関係が定式化される(≡₀ はやはり同時的等値と呼ばれる時間論理結合子)。このような作業を経て抽出されたのが「空間的事象の可逆性」という主観的法則であり演繹システムに(12)のような公準として組み込まれることになる。

$$S5 \equiv_0 S6 \quad (10)$$

$$S7 \equiv_0 S8 \quad (11)$$

$$\chi^R \equiv_0 \chi \quad (12)$$

式(12)において、 χ は空間的事象($g=G_s$ の原子軌跡式の結合列)であり、 χ^R は(13)で定義される再帰的操作(軌跡逆転操作 R)を χ に施したものである。属性値(p や q)の逆転に関しては属性の性質によって結果(p^R や q^R)が異なり、たとえば、位置(A_{12})では $p^R = p$, $q^R = q$ であり方向(A_{13})では $p^R = -p$, $q^R = -q$ である。

$$\left. \begin{aligned} (\chi_1 \bullet \chi_2)^R &\equiv_0 \chi_2^R \bullet \chi_1^R \\ (\chi_1 \Pi \chi_2)^R &\equiv_0 \chi_1^R \Pi \chi_2^R \\ (L(x,y,p,q,a,G_s,k))^R &\equiv_0 L(x,y,q^R,p^R,a,G_s,k) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

この法則に従うと図 5 に示すような地図は FAO の走査が東方向(East)の時に S11 と(14)に対応する空間的事象は逆転操作により、FAO の走査が西方向(West=East)の時の S12 と(15)に対応するものに変換可能である。

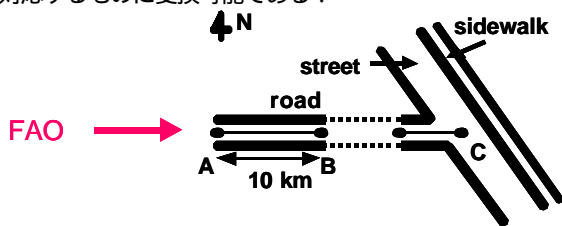


図 5 空間的事象としての地図

ただし、“ $_$ ”は変数記述の省略、“ $_e$ ”は“after a while”に相当し空間的空事象と呼ばれFAO だけの跳躍(skip)を意味する。

(S11) The road runs 10km straight east from A to B, and after a while, at C it meets the street with the sidewalk.

$$(\exists x,y,z,p,q)(L(_x,A,B,A_{12},G_s,_) \Pi L(_x,0,10km,A_{17},G_s,_) \Pi L(_x,Point,Line,A_{15},G_s,_) \Pi L(_x,East,East,A_{13},G_s,_)) \bullet _e \bullet (L(_x,p,C,A_{12},G_s,_) \Pi L(_y,q,C,A_{12},G_s,_) L(_z,y,y,A_{12},G_s,_)) \wedge \text{road}(x) \wedge \text{street}(y) \wedge \text{sidewalk}(z) \wedge p \neq q \quad (14)$$

(S12) The road separates at C from the street with the sidewalk and, after a while, runs 10km straight west from B to A.

$$(\exists x,y,z,p,q)(L(_x,C,p,A_{12},G_s,_) \Pi L(_y,C,q,A_{12},G_s,_) \Pi L(_z,y,y,A_{12},G_s,_)) \bullet _e \bullet (L(_x,B,A,A_{12},G_s,_) \Pi L(_x,0,10km,A_{17},G_s,_) \Pi L(_x,Point,Line,A_{15},G_s,_) \Pi L(_x,West,West,A_{13},G_s,_)) \wedge \text{road}(x) \wedge \text{street}(y) \wedge \text{sidewalk}(z) \wedge p \neq q \quad (15)$$

4.2 「仮想空間領域」に関する公準

人々は日常的に実在以上の事物、たとえばゲシュタルト心理学でいう形態(ドイツ語では Gestalt, 英語では Form), を知覚する。ここで導入する仮想空間領域(ISR: Imaginary Space Region)は広義の空間的形態(Spatial Gestalt)に相当し離散的に配置された事物間の関係を記述するためのものである。たとえば、図 6-a のように一纏まりの仮想空間領域(u)として知覚される空間的事象は S13 のように言語化され(16)のように形式化される。一方、図 6-b のように二つの仮想空間領域(u1 および u2)として別個に知覚される場合はそれぞれが S14 および S15 のように言語化され(17)および(18)のように形式化される。

(S13) The square is between the triangle and the circle. (= The circle, square and triangle are in line.)

$$(\exists u,x,y,z)(L(_u,x,y,A_{12},G_s,_) \bullet L(_u,y,z,A_{12},G_s,_)) \Pi L(_u,Right,Right,A_{13},G_s,_) \wedge \text{ISR}(u) \wedge \text{circle}(x) \wedge \text{square}(y) \wedge \text{triangle}(z) \quad (16)$$

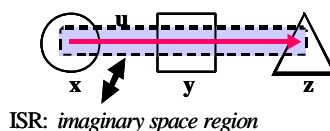
$$(S14) \text{ The square is to the right of the circle. } (\exists u_1,x,y)L(_u_1,x,y,A_{12},G_s,_) \Pi L(_u_1,Right,Right,A_{13},G_s,_) \wedge \text{ISR}(u_1) \wedge \text{circle}(x) \wedge \text{square}(y) \quad (17)$$

$$(S15) \text{ The triangle is to the right of the square. } (\exists u_2,y,z)L(_u_2,y,z,A_{12},G_s,_) \Pi L(_u_2,Right,Right,A_{13},G_s,_) \wedge \text{ISR}(u_2) \wedge \text{square}(y) \wedge \text{triangle}(z) \quad (18)$$

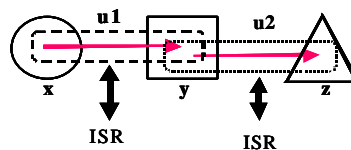
以上の事象間の時間論理関係は(19)のようになり、これを方向(A_{13})の全属性値について一般化した法則が「仮想空間の合成分解」に関する公準(20)となる。

$$S12 \equiv_0 S13 \Pi S14 \quad (19)$$

$$(\forall p)(\exists u,u_1,u_2,x,y,z)(L(_u,x,y,A_{12},G_s,_) \bullet L(_u,y,z,A_{12},G_s,_)) \Pi L(_u,p,p,A_{13},G_s,_) \wedge \text{ISR}(u) \equiv_0 L(_u_1,x,y,A_{12},G_s,_) \Pi L(_u_1,p,p,A_{13},G_s,_) \Pi L(_u_2,y,z,A_{12},G_s,_) \Pi L(_u_2,p,p,A_{13},G_s,_) \wedge \text{ISR}(u_1) \wedge \text{ISR}(u_2) \quad (20)$$



(a) “一直線・列・間”などの多項関係に相当するISR



(b) “左・右・上・下”などの二項関係に相当するISR

図 6 仮想空間領域の例

4.3 「事象の生起時間帯」に関する公準

自然言語表現の中には論理学での定理“対偶”を適用すると S16 と S17 の対に見るように因果関係が逆転して奇異に聞こえることが多い。

(S16) If he is not scolded then he does not study. (=彼は叱られないと勉強しない.)

(S17) If he studies then he is scolded.

(=彼は勉強すると叱られる.)

筆者の行った心理実験結果 [横田 1988] によると、これは人間が一つの命題(P)とその否定命題(~P)を「指示される事象の生起時間帯が同一である」ように理解するのに対して、“if A

then B” (「A するとB する」)の構文においては「A とB の時間関係が明示されない限りA の方が B より先に生起している、すなわち、A が原因で B がその結果である」ように理解するという認知的傾向に起因している。したがって、A と B の時間関係が明示されている S16' と S17' の対では正常に対偶関係が成立しているように聞こえる。

(S16') If he is not scolded then he does not study *later*. (=彼は叱られないと後で勉強しない.)

(S17') If he studies then he is scolded *in advance*.

(=彼は勉強すると前に叱られる.)

このような考察から筆者は事象の生起する絶対時間帯(人間には不可知)を抽出するメタ関数 δ を(21)のように導入している。ここで R は実数の集合、 a は原子軌跡式、 t_{\min} および t_{\max} はそれぞれ任意の軌跡式 χ を構成する全原子軌跡式の時間帯での下限における最小値および上限における最大値を意味する。

$$\left. \begin{aligned} \delta(c) \in D (= \{[t_1, t_2] \mid t_1 < t_2 (t_1, t_2 \in R)\}) \\ \delta(\sim a) = \delta(a) \\ \delta(\chi) = [t_{\min}, t_{\max}] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

この定義に従うと(22)の「時間経過の普遍性」という定理を導くことができる。この定理は「ある客観的事象 X を主観的に c と認識しようがその否定 $\sim c$ と認識しようが X の生じている絶対時間帯に変化はない」ことを意味している。

$$\delta(\sim c) = \delta(c) \quad (22)$$

更に、この(22)を用いると(23)の「時間論理対偶」という定理を導くことができる。

$$\chi_1 \supset \chi_2 \equiv \sim \chi_2 \supset \sim \chi_1 \quad (23)$$

[証明]

$$\begin{aligned} \chi_1 \supset \chi_2 &\leftrightarrow (\chi_1 \supset \chi_2) \wedge \tau_i(\chi_1, \chi_2) \\ &\leftrightarrow (\sim \chi_2 \supset \sim \chi_1) \wedge \tau_i(\chi_1, \chi_2) \\ &\leftrightarrow (\sim \chi_2 \supset \sim \chi_1) \wedge \tau_i(\sim \chi_1, \sim \chi_2) \\ &\leftrightarrow (\sim \chi_2 \supset \sim \chi_1) \wedge \tau_{\sim i}(\sim \chi_2, \sim \chi_1) \\ &\leftrightarrow \sim \chi_2 \supset_{\sim i} \sim \chi_1 \quad \text{[Q.E.D.]} \end{aligned}$$

定理(23)は時間的含意(\supset_i)が人間の日常世界における経験的知識を表現するのに頻りに用いられることから極めて重要である。たとえば、S18 の意味は(24)のように、その言い換え S19 の意味は(25)のように形式化され、これら二つの式は互いに時間論理対偶となっている。

(S18) It gets cloudy *before* it rains.
(=If it rains, it gets cloudy *in advance*.)

$$\text{Rain} \supset_{\sim 5} \text{Get_cloudy} \quad (24)$$

(S19) It does *not* rain *after* it does *not* get cloudy.
(=Unless it gets cloudy, it does not rain *later*.)

$$\sim \text{Get_cloudy} \supset_{\sim 5} \sim \text{Rain} \quad (25)$$

因みに、単なる事実を述べている S20 の言い換えは S21 でありそれぞれの意味は(26)および(27)のように形式化されるので注意が必要である。

(S20) It got cloudy *before* it rained.

$$\text{Get_cloudy} \wedge_{\sim 5} \text{Rain} \quad (26)$$

(S21) It rained *after* it got cloudy.

$$\text{Rain} \wedge_{\sim 5} \text{Get_cloudy} \quad (27)$$

5. むすび

心の機能モデルに基づき人間の主観的な知識や法則を演繹システムとしてモデル化する試みについて概観した。この演繹システムは応用述語論理として構成されるもので、純粋述語論理の定式(公理や定理)と推論規則がそのまま利用でき時空間に関する主観的知識を定式として追加すれば一階述語論理

のレベルで体系的な計算が可能となる利点を有し、知能ロボットにおいて体系的な問題発見・解決が必要となる感覚器・効果器協調(sensor-actuator coordination)のためのプランニングなどにも有効である [Yokota 2007a]。近未来においてロボットが人間の日常生活における真のパートナーとして存在するためには、少なくとも自然言語による人間との意思疎通のために適切で十分な能力が必要である。なかでも感覚や行動に直結する時空間言語に関する理解および表出能力はロボットが一般人と協調的に作業を行う際に最も重要である。したがって、本稿で述べたような特質をもつ時空間言語表現を体系的に生成・理解できる能力を家庭用ロボットなどに備えさせることには大きな意義が存在する [Coradeschi 2003, Nikolaos 2006, Yokota 2007b]。このような目的のために演繹システムに実装される主観的法則としての公準は現在までに 10種類用意されているが今後さらに検討考察を進め拡充および精練を図る予定である。

参考文献

- [Coradeschi 2003] Coradeschi, S. & Saffiotti, A.: "An introduction to the anchoring problem", *Robotics and Autonomous Systems*, 43, pp.85-96, 2003.
- [Logan 1996] Logan, G. D. & Sadler, D. D. A computational analysis of the apprehension of spatial relations. In P. Bloom, M. A. Peterson, L. Nadel, & M. Garrett (Eds.), *Language and Space*, Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
- [Minsky 1986] Minsky, M.: *The society of mind*, Simon and Schuster, New York, 1986.
- [Nikolaos 2006] Nikolaos, M. & Roy, D.: "Grounded Situation Models for Robots: Bridging Language, Perception, and Action", Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Beijing, China, October 2006.
- [Harding 2002] Harding, J. (ed.): "Geo-ontology Concepts and Issues", *Report of a workshop on Geo-ontology*, Ilkley UK, September 2002.
- [Yokota 2005] Yokota, M., & Capi, G.: "Cross-media Operations between Text and Picture Based on Mental Image Directed Semantic theory," *WSEAS Trans. on INFORMATION SCIENCE and APPLICATIONS*, Issue 10, 2, pp.1541-1550, Oct. 2005.
- [Yokota 2006] Yokota, M.: "Towards a Universal Language for Distributed Intelligent Robot Networking," Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC06), pp. 2784-2789, Taipei, Oct. 2006.
- [Yokota 2007a] Yokota, M.: "Towards Intuitive Spatiotemporal Communication between Human and Ubiquitous Intelligence Based on Mental Image Directed Semantic Theory - A General Theory of Tempo-logical Connectives -", Proc. of the 4th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC-07)(LNCS), pp.1066-1078, Hong Kong, China, July, 2007.
- [Yokota 2007b] Yokota, M.: "A Theoretical Consideration on Robotic Imitation of Human Action According to Demonstration plus Suggestion," Proc. of AISB'07 (Convention on Artificial and Ambient Intelligence), pp.307-316, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK, April 2nd-4th 2007.
- [横田 1988] 横田将生: "人間の自然言語理解過程に関する一つの心理実験", *電子情報通信学会論文誌*, J71-D, 10, 1988.