

## 環境モデルにおける物体の見え方と見方

伊庭 斉志<sup>+</sup> 松原 仁<sup>++</sup> 井上 博允<sup>+</sup><sup>+</sup> 東京大学工学部<sup>++</sup> 電子技術総合研究所

## 要約

本論文では、物体の「見え方」と、環境への積極的な働きかけである「見方」という考えを導入し、従来の知能ロボットの環境モデルの機能を非単調論理の枠組みで拡張することを試みる。そしてこの枠組みに基づいた未知の環境下での環境理解の実現について述べる。見え方と見方を用いて環境モデルを管理することで、画像理解の推論結果のような不完全なデータを保持でき、知能ロボットが未知の環境下で行動計画を的確に生成できることを示す。

## View and Visibility for Environment Model

Hitoshi IBA<sup>+</sup> Hitoshi MATSUBARA<sup>++</sup> Hirochika INOUE<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

<sup>++</sup> Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki, 305 Japan

## ABSTRACT

This paper presents a scheme of environment understanding for intelligent robots. The purpose of this scheme is to enable intelligent robots to make appropriate plans for their actions in unknown environments. To realize this scheme, we extend the environment models by introducing concepts of "visibility" and "view". The overall model-management is based on non-monotonic logic inference system, which maintains incomplete data and carries out necessary model-modification. The paper describes advantages of the establishment of this scheme, which frees robot systems from too much dependence on image understanding.

## 1. はじめに

知能ロボットが行動計画を生成する際には環境の的確な理解が必要であるが、従来のロボットシステムでは不完全な情報を修正しながら扱う機能に乏しく、物体の記述が十分に与えられていないような未知の環境下での行動は困難であった。しかしながら、知能ロボットの作業においては環境内の物体を全て認識している必要はなく、誤りが判明した時点で修正を行うことができれば十分である。そのためには、不完全な環境のモデルを扱う機能と、必要な時にモデルを修正する機能を有する環境理解を実現することが不可欠である。

本論文では、環境モデルにおける「物体の見え方と見方」という考えを導入し、従来の知能ロボットの環境モデルの機能を非単調論理の枠組みで拡張することを試みる。そしてそれに基づいた未知の環境下での環境理解の実現について述べる。

## 2. 知能ロボットの環境モデル

環境モデルは環境内の物体の情報・位置の変化をシミュレートするものであり、知能ロボットの環境理解において中心な役割を果たす。従来の知能ロボットでは予め環境の情報がデータとして環境モデルに入力され、その上で行動計画を生成するものが多く、未知の環境下での知能ロボットの行動は困難であった。

未知の環境を的確に扱うためには、環境モデルを自動生成しそれを修正していく機能が必要である。そのために、環境モデルの管理機能を拡張して、

1. 視覚入力からの環境モデルの推論

2. 非単調論理に基づくモデルの管理

を実現した〔伊庭86〕。

以下〔Reiter80〕のdefault-logicの記法・用語を用いて、非単調論理に基づく環境モデルの管理の実現について説明する。

環境モデルEは、一階述語論理のwffの集合Wとdefaultの集合Dからなる。

$$E = \{ W, D \}$$

ここでWは、環境についての予め分かっている知識、入力として与えられた事実、画像理解のルールやアルゴリズム・ヒューリスティックの集合である。つまりWは環境に対する変更されることのない前提である。本稿ではノイズのない線画を入力として仮定しているため、線画入力のデータは常にW中で表現される。

W中には画像理解のためのヒューリスティックが含まれ、これを用いて環境モデルの推論を行う。W中のヒューリスティック全体の集合を $\mathcal{H}$ で表わす。ヒューリスティックは一般にプロダクションシステムのルールの形式をしている。平行T接点のヒューリスティック（以下 $h_T$ と記す）を図1に示す。この $h_T$ は、図の線画に対し $?S1$ と $?S4$ 、 $?S2$ と $?S5$ が同一の面であることを推論する。 $?S1$ 、 $?S2$ などは変数であり、これが実際のデータとマッチして例示化（instantiate）されるとルールが起動される。 $h$ がA,B,...というデータで例示化されることを $h(A, B, \dots)$ と表わす。(CROSS  $?S1 ?S2$ )は面の交線（図では $l_1$ ）を返す関数である。

Dはdefaultの集合である。defaultは、

$\alpha(x) : M \beta_1(x), \dots, M \beta_m(x) / w(x)$   
 という形をしている。ここで  $x$  は変数の組を表わす。これは、 $\alpha(x)$  が成り立つという前提のもとに  $\beta_1(x) \dots \beta_m(x)$  の否定が証明されないならば  $w(x)$  を真とせよ、という意味である。以下では特に誤解のない場合は  $x$  を省略する。

一般に、画像理解のヒューリスティックで推論されたデータ ( $w$ ) は、

$H(w) : M \beta_1, \dots, M \beta_m, M w / w$   
 という形式をしている。ここで  $\beta_1, \dots, \beta_m$  は推論に用いられたデータを表わす。 $H(w)$  は  $w$  の部分集合で  $w$  で例示化されている。

```

IF    T-junction(?S1 ?S2 ?S3)
      T-junction(?S4 ?S5 ?S3)
      Collinear((CROSS ?S1 ?S2)
                (CROSS ?S4 ?S5))
THEN (assume-if-possible)
      SAME-SFACE(?S2 ?S5)
      SAME-SFACE(?S1 ?S4)
CONFIRMED-BY
      MOVE-RIGHT/LEFTWARD
      ALONG(CROSS ?S1 ?S2)
      ATTENTION((CROSS ?S1 ?S2)
                (CROSS ?S4 ?S5))
    
```

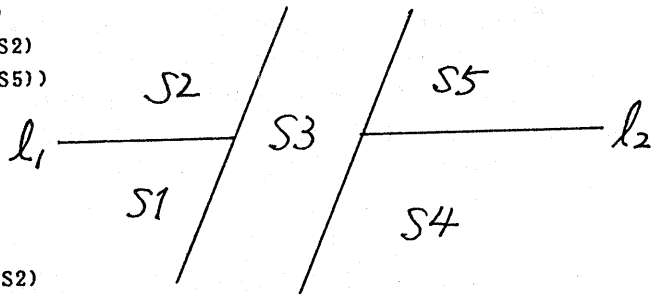


図1 平行T接点のヒューリスティック

図2の入力に対する推論結果のデータの一部分を図3に示す。ここでは環境内には2つの物体OBJECT<sub>1</sub>(wedge)とOBJECT<sub>2</sub>(brick)があり、OBJECT<sub>1</sub>はOBJECT<sub>2</sub>の前にあることが推論される。 $s_7$ はOBJECT<sub>1</sub>の後ろ面である。

環境モデルを非単調論理に基づいて表現することによって、画像理解の推論結果のような不完全な情報を的確に保持することができる。このモデルに基づいて未知の環境下での知能ロボットの環境理解を実現する。次節以降では、この実現のために導入した物体の見方と見え方という概念について説明する。

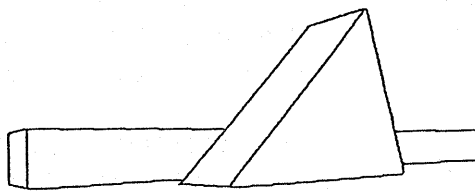


図2 入力となる線画

```

H(OBJECT1): Ms1, Ms2, M OBJECT1/OBJECT1
H(OBJECT2): Ms5, Ms6, M OBJECT2/OBJECT2
H(s6): Ms3, Ms4, Ms6/s6
M OBJECT1, Ms7/s7
    
```

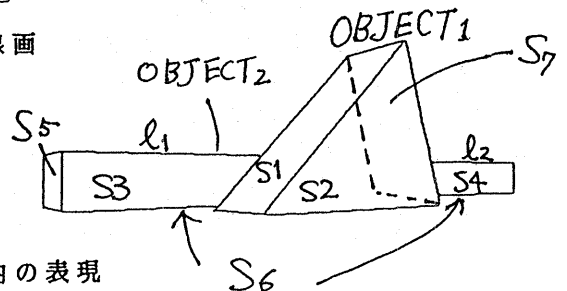


図3 環境モデル内の表現

### 3. 環境モデルにおける物体の見え方

知能ロボットの行動の対象になっている物体の「見え方」に関する知識は、モデル駆動型の画像理解を行うために不可欠である。従って、見え方の推論予測などが効果的に行えるように、物体の見え方に関する知識を環境モデル内に適切に表現しなくてはならない。従来のロボットシステムでは、見え方の知識はモデル駆動型画像理解のテンプレートとしての単なる幾何情報であり、コンピュータ・グラフィックスの隠線・隠面消去の手法を用いて見え方を予測しているに過ぎなかった。しかしながら知能ロボットの環境理解という枠組みにおいては、見え方の知識は単に幾何的なデータではなく、環境モデルの3次元の物体の知識と適切に対応をとり、次の行動（見方）を示唆し修正の手段を導く必要がある。このような機能を実現するために〔松原86〕では、LISP上のFRLという言語の上で、境界表現（B-rep）を用いて見え方の知識を表現した。

B-repは、物体一面一線分の対応関係を保持するリンク構造（winged-edge構造）からなる。モデル  $E = \{W, D\}$  では、この関係を次のように表現する。

W内:	$l_1, l_2, \dots, l_n$	線分
D内:	$H(s_1) : M l_1, \dots, M l_m, M s_1 / s_1$	面
	$H(obj_j) : M s_1, \dots, M s_k, M obj_j / obj_j$	物体

つまりB-repにおける接続関係により、非単調論理の支持関係を構成する。

### 4. 環境モデルにおける物体の見方〔伊庭87a〕

「見方」は、環境モデルの誤りを修正するための環境への積極的な働きかけであり、不完全さを確かめるために知能ロボットの有する手段である。実際には、モデル生成に用いられた推論の仮定（ヒューリスティックの根拠）を論駁するようにして見方は生成される。すなわち見方（ACTで表わす）の生成は、

$$f_v : H' \rightarrow ACT$$

という関数（ $f_v$ ）として表わされる。ここで  $H'$  は  $H$  の部分集合である。

以下ではACTとして、視覚機能を有する移動ロボットを想定してMOVE(DIRECT, DISTANCE, ATTENTION)という移動コマンドを考える。ここでMOVE(a, b, c)は、「aの方向に距離bだけ移動してcを注視する」という指示である。ACTの他の例としては、触角センサを有するロボットに対しての接触面に沿ってセンサ部を動かすという「見方」、ソナーに対してはマイクの位置を動かして音を出すという「見方」などが考えられる。

見方の生成は次のようにして行う。D中から見方の生成の対象となるdefaultの集合  $D'$  ( $D'$  は  $D$  の部分集合) を選び出す。これには画像理解の確からしさや環境内での重要性を考慮した評価関数を用いる。次式のようなdefaultが選ばれたときを考えよう。

$$H(w) : M \beta_1, \dots, M \beta_m, M w / w$$

この時見方の生成の対象になるヒューリスティックの集合  $H'(w)$  を、

$$H'(w) = H(w) \cup H'(\beta_1) \cup \dots \cup H'(\beta_m)$$

とする。即ち  $w$  に例示化された  $H(w)$  と  $\beta_1, \dots, \beta_m$  を導くのに用いられた

全体の再帰的な集合和である。従って見方は、 $f_v((H'(w) | D'))$ となる。

見方生成のために、ヒューリスティックを次の2通りに分ける。

1. 後ろ面の推論                      線形計画法による見方生成を行う
2. その他の推論                      ヒューリスティックに附随する見方生成を行う

以下図2, 3をもとに説明する。OBJECT<sub>2</sub>を見方生成の対象として選んだ場合を考える。対象となるヒューリスティックはH(OBJECT<sub>2</sub>)やH(s<sub>6</sub>)である。H(s<sub>6</sub>)には平行T接点のヒューリスティックh<sub>T</sub>のs<sub>1</sub>~s<sub>4</sub>による例示化h<sub>T</sub>(s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>, s<sub>3</sub>, s<sub>4</sub>)が含まれる。このヒューリスティックh<sub>T</sub>に対する見方は、CONFIRMED-BYというスロット(図1)を参照することで生成される。この場合このスロットはs<sub>1</sub>~s<sub>4</sub>で例示化されていて、s<sub>3</sub>, s<sub>4</sub>の稜線l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>に沿って視点を左右に動かすことを指示する。左右のどちらにどれだけの距離動かすかはこのヒューリスティックからだけでは決まらず、H'中の他のヒューリスティックに対する見方を生成することによって決まる。更にATTENTIONの記述により、どこに注視するかも定まる。この場合T接点の中心線(l<sub>1</sub>とl<sub>2</sub>の延長部分)に注視することになる。

s<sub>7</sub>に対しては見方生成のためのヒューリスティックH(s<sub>7</sub>)が存在しない。s<sub>7</sub>はOBJECT<sub>1</sub>の未だ見ぬ後ろ面として推論されている。このような場合、線形計画法(LP)を用いてs<sub>7</sub>が可視になるまで視点を動かすという見方を生成する。従ってs<sub>7</sub>のようなdefault(隠れた部分)に対しては、H(s<sub>7</sub>) = φとし、そしてφに対する見方はLPを用いて生成するものとする。

見方MOVE(DIRECT, DISTANCE, ATTENTION)が生成されると、知能ロボットの新しい位置(POSITION)と注視点(ATTENTION)が定まる。以下では位置は注視点の組{POSITION, ATTENTION}を知能ロボットの状態と呼ぶ。

## 5. 環境理解の構図

環境モデルE = {W, D}と見方・見え方という考えを用いて、知能ロボットの環境理解を実現する。ここで環境理解とは、環境モデルE = {W, D}を真の環境の記述{W\*}に近付けていくことを意味する。但しW\*は前以て分からないのでW\*\*というW\*の部分集合をEの評価に用いる。W\*\*は現在の知能ロボットの行動生成に必要な知識全体である。とくにW\*\* = W\*とすると、知能ロボットは全ての環境を理解するように行動する。

外界である環境は知能ロボットの状態{POSITION, ATTENTION}に対して、見え方の情報を神託(oracle)として与える。この見え方の入力をORACLE(POSITION, ATTENTION)と表わす。

以上の前提のもとで、知能ロボットのための環境理解の構図(図4)を次のように構成する。

1. 知能ロボットの初期状態を{POSITION<sub>0</sub>, ATTENTION<sub>0</sub>}とする。  
ORACLE(POSITION<sub>0</sub>, ATTENTION<sub>0</sub>)をもとに環境モデルE = {W<sub>0</sub>, D<sub>0</sub>}を推論する。  
N := 0とする。

2.  $(W_N, D_N)$  の extension [Reiter 80] が  $W^{**}$  を含むなら終り。

3. 見方生成の対象となる default の集合  $D'$  を選ぶ。これを、

$$D' = \{d_1, d_2 \cdots d_n\}$$

$$d_i = H_i(w_i) : M\beta_{i,1} \cdots M\beta_{i,n}, Mw_i / w_i$$

とする (但し  $H_i(w_i)$  が  $\phi$  の場合もある)。

この  $D'$  に対して見方  $f_v(\{H_i'(w) \mid D'\}) = \text{MOVE}(\text{DIRECT}, \text{DISTANCE}, \text{ATTENTION})$  を生成し、新しい知能ロボットの状態  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  を求める。

4.  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  に対して、 $w_1 \cdots w_N$  がどう見えるかの、見え方の予測を求める。これをそれぞれ  $w_i(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  と表わす。

5. ORACLE  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  と  $\{w_i(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})\}$  をもとにして、 $w_1 \cdots w_N$  を修正する。これには3つの場合がある。

CASE1:  $w_i(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  が ORACLE  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  内に存在する。

→  $w_i$  が ORACLE により確認される。

$$D_N := D_N - \{d_i\} \quad W_N := W_N \cup \{w_i\}$$

CASE2:  $w_i(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  を否定するような事実が ORACLE  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  内に存在する。

→  $w_i$  が ORACLE により否定される。

$$W_N := W_N \cup \{\neg w_i\}$$

CASE3:  $w_i(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  に関する情報が ORACLE  $(\text{POSITION}_{N+1}, \text{ATTENTION}_{N+1})$  内に存在しない。

→  $w_i$  は確認も否定もされない。

6.  $W$  内のヒューリスティックと新たに得られた事実を用いてモデル修正を行い、新たな環境モデル  $E = (W_{N+1}, D_{N+1})$  を求める。

$N := N + 1$  として 2 へ。

2 の段階で終了することは、環境に対して十分な知識を得たので見方の生成を止めることを意味する。知能ロボットは環境内の物体を全て認識している必要はなく、誤りが判明した時点で修正を行うことができれば十分であり、そのための終了の判断が  $W^{**}$  を用いてなされている。将来別の事象の発生 (新たな矛盾が発見された時や外的な要求が出された時など) により見方の生成をする場合には、 $E$  を  $(W_N, D_N)$  として再開し 3 へ進む。

この構図に従って環境理解のシミュレーションを行った。 $W$  中のヒューリスティックを補強することで、様々の入力を見え方として扱うことが可能になる。

[伊庭 87b] では、線遠近法を利用して 2 次元の線画入力を中心とした環境理解を実現している。[伊庭 87c] はノイズの扱いについて述べている。

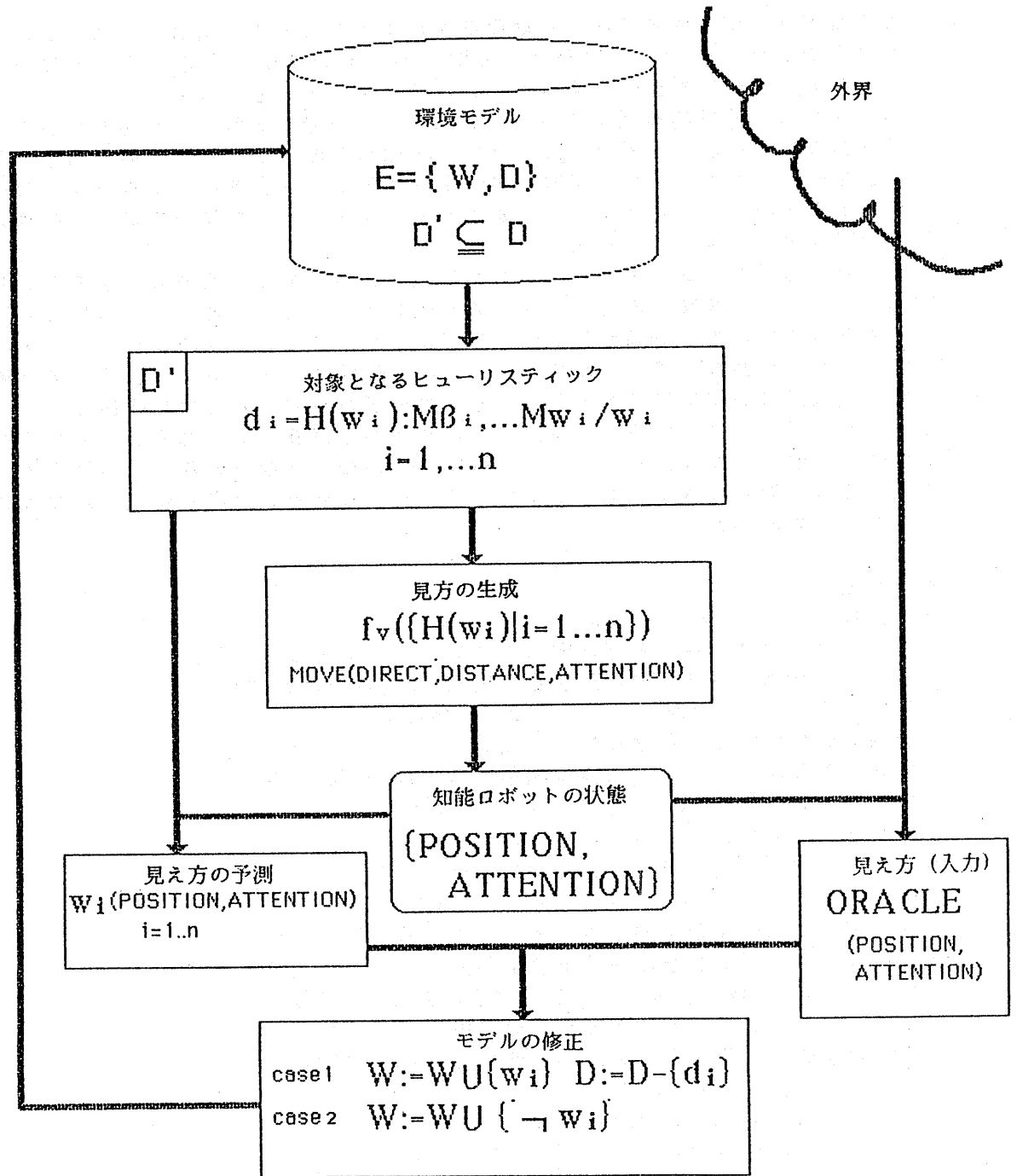


図 4 環境理解の構図

## 6. おわりに

知能ロボットが行動する場合には環境を理解することが不可欠であるが、必ずしも完全な環境モデルは必要ない。知能ロボットがモデルを修正する手段を有し、不完全なモデルを適切に管理することができれば十分である。

本論文では、非単調論理に基づいて環境モデルの管理を行い、知能ロボットにおける環境理解の構図を構成した。特に、環境への働きかけとしての「見方」と非単調論理に基づくモデルの管理を実現することで、画像理解による推論結果のような不完全なデータを保持し、知能ロボットシステムが未知の環境下での確に行動計画を生成できることを示した。

現在我々は、次の2つの点について本論文で述べた環境理解を拡張することを試みている。第一は環境理解に上からの知識を用いることである。この種の知識を非単調論理の枠組みで表現し、モデル管理に利用することは難しくない。環境理解を上からの知識を用いて制御することは、知能ロボットシステムのカメラの位置や注視点の制御に不可欠である。第二は環境理解における学習機能である。これは  $E = \{W, D\}$  中の  $W$  を修正していくことを意味する。見方と見え方の予測の部分に学習を取り入れることによって、人間のような柔軟な環境理解が実現可能になり、知能ロボットシステムに画像理解の機能をより有効に取り込むことができると思われる。

## 参考文献

- [伊庭 86] 伊庭 斉志、井上 博允：  
”環境モデルの自動生成と非単調論理に基づくモデルの管理”，  
第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.121-122,1986
- [伊庭 87a] 伊庭 斉志、井上 博允：  
”環境モデルの管理における物体の見方”，  
情報処理学会第34回全国大会予稿集，pp.1737-1738,1987
- [伊庭 87b] 伊庭 斉志、井上 博允：  
”知能ロボットにおける環境理解”，  
第1回人工知能学会全国大会，pp.431-434,1987
- [伊庭 87c] 伊庭 斉志、井上 博允：  
”ノイズの定量的解釈に基づく環境モデルの管理”，  
第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集,1987 (発表予定)
- [松原 86] 松原 仁、伊庭 斉志、井上 博允：  
”環境モデルにおける物体の見え方の知識”，  
情報処理学会，知識工学と人工知能研究会，48-9,1986
- [Reiter 80] Reiter, R.：  
”A logic for default reasoning”，  
Artificial Intelligence, 13, pp. 81-132, 1980