

不完全情報環境下における時系列データと仮説推論による行動決定

Action Decision with Temporal Data and Hypothesis Reasoning

in Incompleting Information Environment

大塚 忠広† 篠田 孝祐‡ 伊藤 暢浩† 陳 慰† 和田 幸一†

Tadahiro Otsuka, Kosuke Shinoda, Nobuhiro Ito, Wei Chen, Koichi Wada

† 名古屋工業大学 電気情報工学科

†Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology

†otsuka@phaser.elcom.nitech.ac.jp

{itoh,chen,wada}@elcom.nitech.ac.jp

‡ 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

‡Graduate School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

‡kshinoda@jaist.ac.jp

Abstract

マルチエージェントシステム (MAS) において、各エージェントは自分のもっている情報に基づいて行動決定をおこなう。しかし、実世界に近いような実時間性や不確実性をもつ環境では、行動決定に必要な情報を常に得ることはできない。本研究では、時系列データと仮説推論を用いることにより、実時間で不完全な情報の補完をおこなうエージェントを設計した。また、人工知能、ロボティクスなどさまざまな分野を統合したランドマーク問題である RoboCup の MAS を対象に適用した。そして、RoboCup シミュレータ部門のサッカーエージェントを実装して、この時系列データベースの不完全情報の補完に対する有効性、およびそのデータの信頼性の評価をおこなった。その結果、時系列データベースから行動決定に利用可能となるより多くの信頼のおける情報が得られることをしめた。

1 はじめに

マルチエージェントシステム (MAS) とは、各エージェントがそれ単体では解決できないような問題、または解決が困難となるような問題に対して、複数のエージェントが協力して解決をおこなうシステムである。このシステムにおいて各エージェントは自分の持っている情報に基づいて行動決定をおこなう。RoboCup の MAS は人工知能、ロボティクスなどさまざまな分野を統合したランドマーク問題を含むテストベッドとして注目されている。RoboCup のエージェントはサッカーサーバー [1] と呼ばれるフィールド情報から環境情報を獲得する。そして、その情報に基づき行動を決定する。しかし、実時間性や不確実性をも

つ環境では時間によって状態が変化していく。このような環境ではエージェントの行動決定に必要な全ての情報を常に得ることはできない。したがってエージェントの行動決定ではこのような不完全な情報を考慮する必要がある。例えば RoboCup のサッカーエージェントでは次のようにモデル化されている。

サッカーエージェントは視界が制限されているため、完全な情報を常に得ることはできない。サッカーエージェント (プレイヤー) は以下にしめす範囲内にあるオブジェクトを「見る」ことができる。

View Cone: 自分の向いている方向から $[-45^\circ, 45^\circ]$ の視野範囲。ただし視野が広い場合は $[-90^\circ, 90^\circ]$ 、狭い場合は $[-22.5^\circ, 22.5^\circ]$ の範囲となる。

Neighborhood: 自分の位置から距離が 3m 以内の範囲。

Neighborhood かつ View Cone 外の範囲にあるオブジェクトに対してはそのオブジェクトの型 (プレイヤー、ボールなど) のみ認識できる。しかし、そのオブジェクトの正確な名前は認識できない。また、View Cone 内の範囲にあるオブジェクトとの距離が遠いほど、そのオブジェクトに関する情報の欠落部分が多くなる。

本研究ではエージェントの行動決定に対し時系列データベースと仮説推論を導入し、不完全情報の補完をおこなうことにする。時系列データベースは各エージェントの状態などの情報を時系列にしたがい蓄積し、それらの情報を用いて環境から得られた一部またはすべて欠落した情報に対して仮説推論を用いて欠落情報の補完をおこなう。また、RoboCup のサッカーエージェントとして実装をおこない、その有効性および信頼性を検証する。

以下2節では環境から得られる情報について説明する。3節では、時系列データベースに関する基本概念およびその特徴について述べ、4節でその処理の流れを説明する。5節で評価をおこない、最後に6節でまとめと今後の課題についての考察をおこなう。

2 不完全情報

本研究におけるオブジェクトの情報とは、周囲の環境から観測された他のオブジェクト一つ一つの情報であり、次の四種類がある。制約つき情報とは、あるオブジェクトに対して時間の経過の中である制約に基づいて変化をしている情報である。例えば、「一定時間内には一定の距離しか移動できない」という制約をもつオブジェクトの位置情報などなどである。

- **完全情報:** あるオブジェクトに関する情報がすべて揃っている情報
- **制約つき情報がすべて欠落した情報:** あるオブジェクトに関する情報のうち制約つき情報がすべて欠落している情報
- **一部欠落情報:** あるオブジェクトに関する情報のうち、少なくとも一つの制約つき情報を含むが、それ以外の情報の一部またはすべてが欠落した情報
- **完全欠落情報:** あるオブジェクトに対するすべての情報が欠落した情報

3 時系列データベース

ある時刻において観測したあるオブジェクトの情報の集合をそのオブジェクトの時刻データと呼ぶ。

定義 1 (時刻データ)

時刻 t においてオブジェクトの識別子 $ID = i$ で識別できるオブジェクトの時刻データは次のように記述する。

$TemporalData ::= \langle Object_i^t \rangle$

$\langle Object_i^t \rangle$ は時刻 t におけるあるオブジェクト " ID " の情報の集合を表わす。

時刻 t にオブジェクト A (識別子 $ID = i$) の完全情報が得られない場合、 $\langle Object_i^t \rangle$ は補完されたものである。

時系列データベースに補完された情報を扱うにあたり、その情報の信頼性が重要なものとなる。本研究では、時系列データベースに補完されるデータとしてより信頼のできるデータを補完できるようにするため、Time Map に格納される各時刻データに対し信頼度を設ける。

定義 2 (信頼度)

時刻 t におけるオブジェクト A の信頼度 $Confidence$ は次のように記述できる。オブジェクト A の識別子を $ID = i$ とする。

$$Confidence(\langle Object_i^t \rangle) = \begin{cases} 1 & \text{(完全情報)} \\ Confidence(\langle Object_i^{t'} \rangle) & \text{(一部欠落情報)} \\ Confidence(\langle Object_i^{t-1} \rangle) - \epsilon & \text{(完全欠落情報)} \\ \text{および制約つき情報がすべて欠落した情報} \end{cases}$$

信頼度は時刻 t の観測情報によって値は異なる。時刻 t' は $t_0 \leq t' < t$ かつ時刻 t からさかのぼって最も信頼度の高い値を取る時刻である。また、 ϵ は信頼性の減少度である。

ただし、時刻 $t = 0$ のとき

$$Confidence(\langle Object_i^0 \rangle) = 0$$

また、 $0 \leq Confidence(\langle Object_i^t \rangle) \leq 1$ であり、

$Confidence(\langle Object_i^t \rangle) < 0$ となるときは

$$Confidence(\langle Object_i^t \rangle) = 0 \text{ とする。}$$

時刻データをオブジェクトの識別子 ID ごとに集めたものを時間マップと呼ぶ。

定義 3 (時間マップ)

時間の区間 $[t_0, t]$ (ただし $0 \leq t_0 \leq t$) におけるオブジェクトの識別子 $ID = i$ の時間マップ (Time Map) を次のように定義する。

$TimeMap(i)$

$$::= \{ \langle Object_i^k \rangle, Confidence(\langle Object_i^k \rangle) | t_0 \leq k \leq t \}$$

ここで $t - t_0$ は時間マップにどれだけの時刻データを蓄えるのかを意味する。 $t - t_0$ の値は時間マップに格納されているデータを検索するのに時間がかかるため、一シミュレーションサイクルで処理が可能となるように現在、実装を通して経験的に $t - t_0 = 20$ としている。

サッカーエージェントにおける信頼度の決定方法の例を図1に示す。サッカープレイヤーは自分の視界に入っているプレイヤーの情報を得る。その情報が完全であるである場合、その情報をしめすプレイヤーの Time Map にデータを格納し、そのデータに対する信頼度は1となる。情報の一部が欠落している場合、Time Map に格納されている過去のデータを仮説として利用する。利用されたデータの信頼度が現在格納されるデータの信頼度となる。視界外のプレイヤーの情報は全く入ってこない。その場合は制約つき情報がすべて欠落した情報として扱い、一つ前のデータを現在のデータとして補完する。現在のデータに対する信頼度は一つ前のデータの信頼度を減少度分だけ引かれた値となる。

以上のことから時系列データベースは次のように表現できる。

時系列データベースとは、各オブジェクトごとの Time Map から構成された、不完全情報を扱うための知識ベースの一種である。時系列データベースの概念図を図2に示す。各オブジェクトはこの時系列データベースを一つずつ持つ。

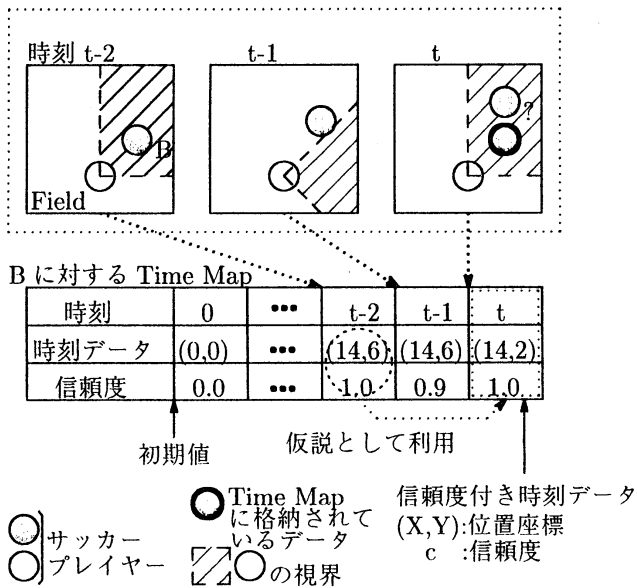


図 1: 信頼度の決定

定義 4 (時系列データベース)

オブジェクトが n 個存在するとき、時刻 t における時系列データベースは次のように記述できる。

Temporal Database

$$::= \{TimeMap(i) | 1 \leq i \leq n\}$$

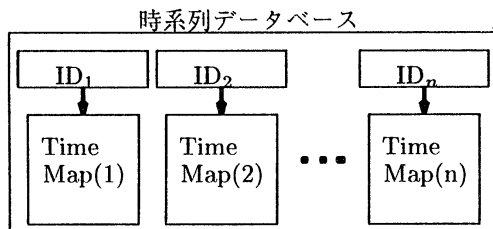


図 2: 時系列データベース

時系列データベースは時刻による各オブジェクトの属性の変化の履歴を知識の一つとして扱うことができる。また、その知識と制約により、不完全情報を補完することができる。

4 時系列データベースの処理の流れ

時系列データベースの更新は以下のようにおこなわれる。

1. 情報の加工: 環境から得られた情報を時系列データベースで扱える形式に変換する。
2. 情報の補完: 得られた情報が不完全であった場合、時系列データベースに補完されている過去のデータを用いて仮説推論によるオブジェクトの同定をおこなう。それによって識別した情報をそのオブジェクトに対する Time Map に格納する。

3. 信頼度の決定: 補完した情報に対して信頼度を決定する。

時系列データベースの処理の流れを図 3 にしめす。

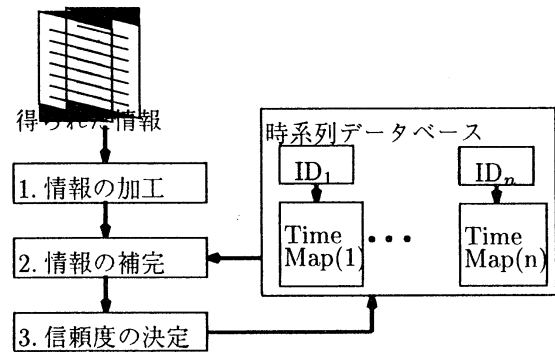


図 3: 時系列データベースの処理の流れ

これから、情報の補完方法について述べる。

ある時刻 t と t^* ($t_0 \leq t^* < t$) のときを考える。時刻 t^* におけるオブジェクト I^* の情報と時刻 t のときのオブジェクト ID の欠落したオブジェクト X の情報の間に制約集合 C が成立するとき、オブジェクト X の情報はオブジェクト I^* の情報に同定できるという。

定義 5 (オブジェクトの同定)

二つのオブジェクト I^*, X の ID をそれぞれ i^*, x とする。オブジェクトの同定を " $\rightarrow$ " で表現できるとする。またオブジェクト I^* の情報は時刻 t^* 、 X の情報は時刻 t とすると、次のように書ける。

$$x \rightarrow i^* \Leftrightarrow \langle Object_x^t \rangle \mathcal{C} \langle Object_{i^*}^{t^*} \rangle$$

$$\text{ここで } i^*, x \text{ は } Confidence(\langle Object_x^t \rangle) = 1 \leq \min_{i \leq n}$$

$\{ t_0 \leq t^* < t \mid \{ t_0 \leq t^* < t \mid Confidence(\langle Object_x^t \rangle) \mid \langle Object_x^t \rangle \mathcal{C} \langle Object_{i^*}^{t^*} \rangle \} \}$ また " $\mathcal{C}$ " は制約条件 C のもとでオブジェクトが同定できることをしめす。したがって $\langle Object_x^t \rangle \mathcal{C} \langle Object_{i^*}^{t^*} \rangle$ は制約集合 C のもとでオブジェクト X の情報が I^* の情報と同定できることを表わす。

オブジェクトの同定により、エージェントは時系列データベースと制約条件から、得られた情報がどのオブジェクトに関するものかを定めることができる。これにより、不完全な情報に対して補完をおこなうことが可能となる。図 4 にサッカーエージェントにおける情報の識別および補完の例をしめす。プレイヤーは他のプレイヤーの位置情報を受け取ると、その情報がどのプレイヤーに関する情報であるか識別する。このとき、プレイヤーの背番号などの識別子により識別をおこなう。時刻 t において B の背番号が欠落していた場合、 B の Time Map の時刻 $t-1$ に格納されている位置情報と制約条件である行動可能範

図により、その情報が B のものであると識別することが可能となる。

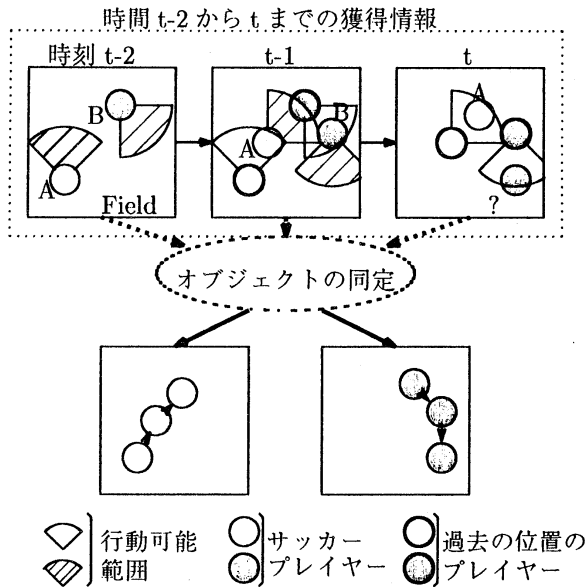


図 4: オブジェクトの同定

4.1 仮説推論によるオブジェクトの同定

仮説推論 [2, 3, 4, 5] とは、観測事実とその事実が成り立つ公理から、公理の前提条件を仮説として導き出す推論である。また、仮説推論において公理の集合のことを制約条件と呼ぶ。仮説推論は次の過程を経て仮説生成をおこなう。

1. 観測事実と公理から仮説を生成する。このとき仮説が複数あれば仮説空間が形成される。
2. この生成された仮説が無矛盾であるかの検証。

オブジェクトの同定はこの仮説推論によっておこなわれる。この仮説推論におけるオブジェクトの制約条件が明確であれば、オブジェクトはその制約条件を満たす範囲でしか変化することはできない。オブジェクトの制約の概念図をサッカーエージェントを例として図 5 にしめす。エージェントの過去の位置と移動可能範囲から現在の行動可能範囲を限定することができる。

仮説推論によって生成される仮説は一つとは限らない。この仮説の集合を仮説空間と呼ぶ。

定義 6 (仮説空間)

時刻 t における時刻データがオブジェクト A のものであるという仮説空間は次のように定義できる。ただしオブジェクト A の識別子は a とし、時刻 t' は $0 \leq t' \leq t$ とする。また、オブジェクトの総数は n とする。

$$\text{HypothesisSpace}_a^t ::= \{i | (\text{Object}_a^{t'}) \rightarrow \langle \text{Object}_i^{t'} \rangle, 1 \leq i \leq n\}$$

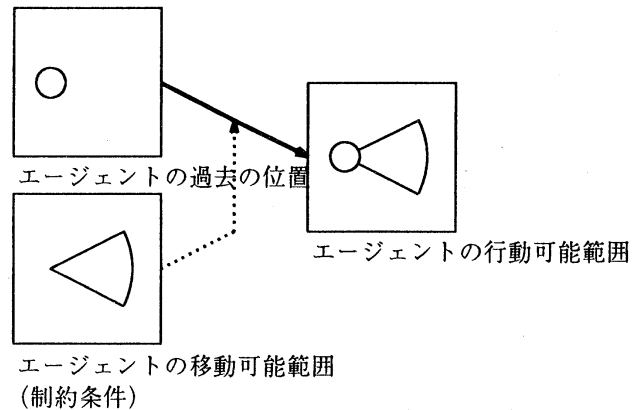


図 5: エージェントの制約による行動可能範囲の限定

したがって仮説はオブジェクトの識別子であり、仮説空間はオブジェクトの識別子の集合となる。

オブジェクトの同定をおこなうために仮説空間から仮説の一つを選択する必要がある。そこで、以下の手順によって仮説の選択をおこなう。

1. 仮説空間内のオブジェクトの情報をデータの欠落が少ない順にならべる。
2. 最もデータの欠落が少ない仮説を選択する。
3. その仮説が矛盾しているかどうかを調べる。
 - (a) 矛盾していれば、その仮説を仮説空間から取り除く。
 - (b) 矛盾していなければ、その仮説が候補となる。

これにより仮説は一つに決定することができ、欠落した情報の仮説が導かれる。よって不完全情報が識別され補完が可能となる。

ただし、本モデルでは、矛盾の検出は検討中の課題である。したがって本研究では、一つに制限できない場合は最初にマッチングしたものを選択する。

4.2 信頼度を加えたオブジェクトの同定

仮説を生成するにあたって、Time Map に格納されている過去のデータを用いる。このとき、そのデータの信頼性に関わらず仮説を生成することになる。その生成された仮説空間に対し候補の一つを選択する。その結果、補完した情報は必ずしも信頼のおけるものではない。

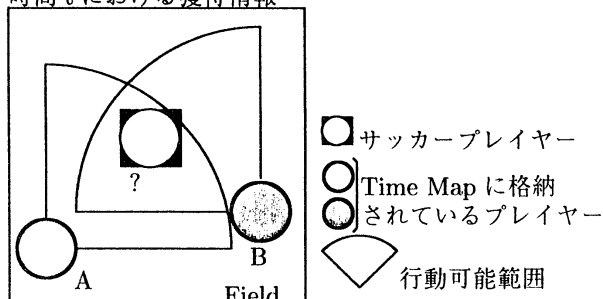
そこで、生成する仮説に対して信頼度を求め仮説の選択をおこなう。以下にその手順をしめす。

1. 各オブジェクトの Time Map に格納されているデータと比較する。
2. 制約条件を満たしているデータを仮説とし、最も信頼度の高い仮説を候補とする。

これにより、信頼性の高いデータが補完されることになる。また、生成される仮説の数も少なくなるので高速化が計れることになる。図 6 にサッカーエージェントにおける信頼度によるオブジェクトの同定の例をしめす。時刻

t に背番号の欠落したプレイヤーの情報が得られた場合、Time Map に格納されているデータに基づいて識別をする。A,B ともに制約条件を満たしているとき、B より A の信頼度が高い方場合そのプレイヤーは A である可能性が高い。

時間 t における獲得情報



B よりも A の信頼度が高い場合
? は A である可能性が高い

図 6: 信頼度によるオブジェクトの同定

5 評価実験

時系列データベースをもった RoboCup のサッカーエージェントの実装をおこない、データベースを使用しないものとの比較をおこなった。RoboCup サッカーサーバーから送られる以下にしめす二つの情報に注目して実験をおこなった。

- チーム名 (味方、敵、判別不能)
- 背番号 (1 から 11、判別不能)

この二つの情報がともに欠落した場合、その情報はどのプレイヤーの情報であるか識別できなくなる。これらの情報が本実験におけるオブジェクトの識別情報となる。この実験では 1 試合、前後半合わせて 10 分間、合計 20 試合をおこない不完全情報の補完をおこなった。時系列データベースの Time Map の区間は $t - t_0 = 20$ 、信頼度の減少度は $\epsilon = 0.1$ である。

チーム名、背番号を補完した割合を図 7,8 にしめす。縦軸は一度で得られる情報の最大プレイヤー数 (21 人) に対する割合を表わし、横軸は味方ゴールからの相対的な距離としたプレイヤーの位置を表わしている。グラフは上から実際に得られた全情報の割合、時系列データベースによって補完した情報の割合、時系列データベースをもたない場合の補完した割合をしめす。つまり、二つ目と三つめのグラフの差が時系列データベースによる不完全情報の補完の割合をしめす。

図 7 ではチーム名の識別ができたプレイヤー数の平均が 3.3 人 (13.2%) 増加していることがみられた。また、図 8 では背番号の識別ができたプレイヤー数の平均が 0.8 人 (4.1%) 増加していることが確認できた。

チーム名の補完

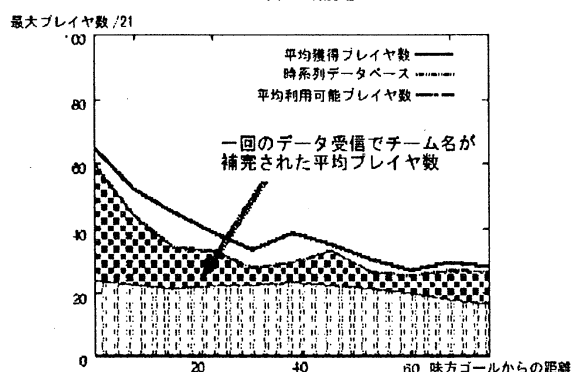


図 7: チーム名の補完

背番号の補完

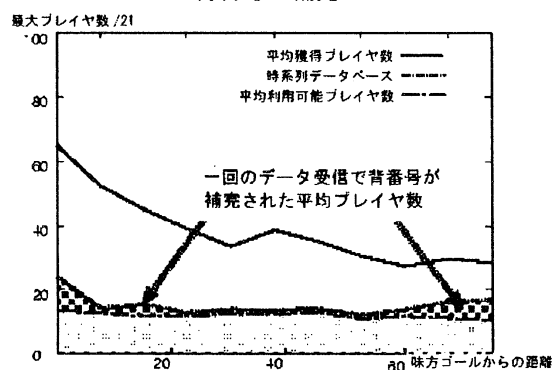


図 8: 背番号の補完

また、データの信頼性を評価するためにデータベース上のプレイヤーの位置情報とコーチクライアントによる情報との比較をおこなった。コーチクライアントはプレイヤーの位置情報を完全に補完できるものである。

この結果時系列データベースに補完されたデータの正しさは 95% であることが確認できた。

この結果から時系列データベースは不完全情報の補完に有効であることをしめた。また、信頼度により補完されたデータは信頼のおけるものであることをしめた。したがって各プレイヤーは時系列データベースにより行動決定に対して信頼のおけるより多くの情報を扱えるようになった。

6 まとめ

本研究では、時間に関する知識の生成、蓄積を目的とする時系列データベースの概念およびその処理について説明をおこなった。また実時間上で仮説推論をおこなうことにより不完全情報が仮説として補完され、時系列データベースが情報の補完に有効であることをしめた。さらに信頼度の導入により補完されたデータの信頼性をしめし、

生成される仮説を少なくすることによる高速化が計れた。

仮説推論による処理は時間がかかるため、実時間性をもつ環境では大きな問題となる。よって制約条件を学習などによりもとめ高速化をおこなう必要がある。また、データの信頼性をより高めるため、信頼度の決定および減少度 ϵ をより明確に定義する必要がある。

参考文献

- [1] David Andre, Emiel Corten, Klaus Dorer, Pascal Gugenberger, Marius Joldos, Johan Kummeneje, Paul Arthur Navratil, Ituki Noda, Patrick Reley, Peter Stone, Tomoichi Takahashi and Tralvex Teap, Soccerserver manual ver.4.02, <http://www.dsv.su.se/~johank/RoboCup/manual/ver4.02release/main.pdf>, 1998.
- [2] 國藤進. 仮説選定機構の一実現法. 人工知能学会誌, Vol. 1, No. 2, pp. 70-70, 1986.
- [3] 國藤進. 仮説推論. 人工知能学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 22-29, 1987.
- [4] 松田哲史, 石塚満. 仮説推論システムの拡張知識と概念学習. 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 1, pp. 99-102, 1988.
- [5] 新田克己. 時間を含む知識の表現と推論. 人工知能学会誌, Vol. 3, No. 5, pp. 33-40, 1988.
- [6] Nobuhiro Ito, Kouichi Nakagawa, Takahiro Hotta, Xiaoyong Du, Naohiro Ishii. EAMMO :an environmental agent model for multiple objects. *Information and Software Technology*, Vol. 40, pp. 397-404, 1998.