

特集 「定理証明, 推論関係の新技術」

モデル検査に基づく知識・信念の推定

Inferring Other Agents' Knowledge and Belief by Model Checking

磯崎 秀樹
Hideki Isozaki

日本電信電話 (株) NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation.
isozaki@cslab.kecl.ntt.co.jp, <http://www.kecl.ntt.co.jp/ic1/kpro/isozaki/>

勝野 裕文
Hirofumi Katsuno

東京電機大学理工学部
Faculty of Science and Engineering, Tokyo Denki University.
katsuno@j.dendai.ac.jp

Keywords: belief ascription, model checking, modal logic.

1. はじめに

本解説では、複数の自律的なエージェントからなる環境が時間とともに変化するとき、その変化を観測する各エージェントが各時点でどのような知識・信念をもっているかを推測する方法について述べる。

我々が日常信じている多くのことは、社会の変化とともに時代遅れになってしまう。あるいは、長く信じられていたことが間違いであることがあとでわかったりする。次々と入ってくる情報のどれが最新なのか、どれが今正しいと考えられているのかを整理しておくことは、間違った判断をしないために重要なことである。

同じことはソフトウェアエージェントやロボットなどの人工的なエージェントについてもいえる。最近、特定の分野の情報に限らず、さまざまな質問に答えてくれるオープンドメイン QA (質問応答) システム [Harabagiu 00, 賀沢 00] が注目されてきているが、こうしたシステムは、ユーザが日本語や英語などの自然言語で質問を入力すると、大量の文書データから関連する情報を探し出して中身を解析し、質問に直接答えてくれるので、従来の情報検索より簡単にほしい情報を入手できる。しかし、ここでも情報を整理する必要がある。例えば「〇×国の首相は誰ですか」という質問は現在の首相の名前を尋ねているのであり、10年前の文書に書かれている首相の名前を見つけて答えても、当たっていることはあまり期待できない。もし1か月前の文書に首相として別の名前が書かれているのなら、そちらを答えたほうが正解する可能性が高いであろう。

エージェントが人間と、あるいはエージェントどうしで会話を行うとき、一方あるいは双方が間違った知識や古い知識を前提にして話していると、話が通じなくなってしまう可能性がある。あるいは、誤解に気づかないまま話が通じたつもりになり、行動を起こそうとして失敗する、ということが考えられる。

これらの問題に取り組むにはまず知識とは何かを明らかにして、形式的な議論ができる基盤をつくる必要がある。しかし、知識とは何かについて哲学や論理学では多くの議論がなされているものの、その形式化についてのコンセンサスはいまだ得られていない。本解説では以後、実際には正しくないかもしれないが現時点では正しいと知っている情報を「信念 (belief)」と呼び、考慮の対象としている時間の間はいつも正しい情報を「知識 (knowledge)」と呼ぶことにする。すると、上記の問題はマルチエージェントシステムにおいて他者の知識・信念を推定する問題ということが出来る。

他者の信念を推定するという課題は、しばしば「信念帰属 (belief ascription)」と言われるが、システムに組み込むことを想定して、効率良く信念を推定する方法の工学的研究は現在ほとんど行われていない。過去に遡ると、対話システムの推論機能として提案された例がある [Appelt 85, Konolige 86, Konolige 88]。そこでは様相論理を用いて領域知識や対話の内容や信念を記述し、相手のもつ信念を定理証明により推論する方法が採用されている。

また、他者の知識を推定する課題は人工知能というよりはむしろ分散処理の分野で研究されている [Fagin 95]。この課題は主に理論的見地から解析が進められていて、その結果を信念の推測と組み合わせて工学的に応用する研究はまだ進んでいない。

知識や信念を様相論理で表現する過去の研究には、例えば以下のような問題点が指摘されている。

- 現実の人間やエージェントの推論能力は限られているが、通常の様相論理ではこの限界が表現できず、違和感がある。(論理的全知の問題)
- 様相論理に限らず一般に論理では厳密な推論が必要だが、それには膨大な数の可能性を考慮する必要があるため、非現実的な処理時間がかかる。(処理時間の問題)
- 新しい情報がそれまでの信念と相容れないとき

に、それまでの情報をなるべく生かしながら整合性のある新しい信念の状態をつくり出す方法がわからない。(信念修正・更新の問題)

これらの問題に対して、すでにいくつかの改良方法の提案が行われているが、いまだ最適な方法は見つからない。また、これらの問題すべてを本稿で議論することはできないので、本稿では現時点で我々のグループが採用した改良方法について説明する。

推論の研究では定理証明を用いるのが普通であった。しかし、定理証明は一般に膨大な計算量が必要な問題であることが知られており、複雑な推論を限られた時間で行うことは実際上不可能である。そこで、Halpernら [Halpern 91] は推論の問題の一部にモデル検査を利用することを提唱している。つまり、特定のモデルがある特定の性質を満たしているかどうかだけ調べる問題に置き換えることにより、計算量を削減しようというのである。本稿で述べる知識・信念の推測もこのモデル検査の手法を用いることによって、「処理時間の問題」の解決を試みている。

2. 知識と信念の論理的表現

本章では知識と信念を形式的に表すのに用いる論理的表現について述べる。

2.1 Kripke モデル

知識や信念の論理的モデルとして古くから用いられているのは、様相論理で標準的に用いられる Kripke モデルである [Chellas 80, Fagin 95]。Kripke モデルを用いることにより、自分のもつ情報に合致する複数の可能性を考慮することができる。Kripke モデルでは、可能世界の集合 W を考え、その中のある世界 w_0 にいるエージェント a がある世界 w_1 を可能性の候補として考えることを $w_0 R_a w_1$ という 2 項関係で表す。 n 人の信念または知識を表す Kripke モデルは、 $M = \langle W, R_1, \dots, R_n, \pi \rangle$ で表せる。ここでは、 π は各可能世界 $w \in W$ の各命題変数 $p \in \Phi$ に真偽を割り当てる関数 $\pi: W \times \Phi \rightarrow \{t, f\}$ である。

本稿では、エージェント a の知識を表すときには K_a 、信念を表すときには B_a という様相記号を用いる。知識や信念に関する命題はこれらの様相記号を含んだ論理式(様相論理式)で表される。

Kripke モデル M のある世界 $w \in W$ で様相論理式 ϕ が成り立つことは $M, w \models \phi$ で表され、以下のように再帰的に定義される。

- 任意の命題変数 $x \in \Phi$ について、 $\pi(w)(x) = t$ で $M, w \models x$ を定義する。
- $M, w \models \phi \wedge \psi$ は $M, w \models \phi$ かつ $M, w \models \psi$ と等価である。
- $M, w \models B_a \phi$ (知識の場合 $M, w \models K_a \phi$) はエージェ

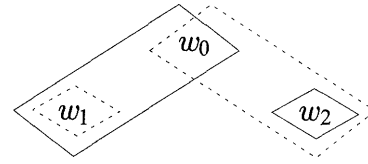


図1 Kripke モデルの例— M_0

ント i が可能と考えるすべての世界 v (つまり $w R_i v$) で $(M, v) \models \phi$ であることと等価である。

- $M, w \models \neg \phi$ は $M, w \not\models \phi$ と等価である。

なお、 $\phi \vee \psi$ は $\neg(\neg\phi \wedge \neg\psi)$ で、 $\phi \rightarrow \psi$ は $\neg\phi \vee \psi$ で定義する。

エージェントが 2 人の場合の Kripke モデルの一つの例、 $M_0 = \langle W_{12}, R_1, R_2, \pi_0 \rangle$ を図 1 に示す。この例では、可能世界が三つあり、 $W_{12} = \{w_0, w_1, w_2\}$ である。また、 R_1, R_2 は同値関係であると仮定し、 R_1 の同値類を実線で、 R_2 の同値類を破線で表す。例えば、 w_0 と w_1 は R_1 の同じ同値類に属するので、 $w_0 R_1 w_0$ や $w_0 R_1 w_1$ が成り立つ。しかし、 w_0 と w_2 は R_1 の異なる同値類に属するので、 $w_0 R_1 w_2$ は成り立たない。また、 π_0 は $\pi_0(w_0, p) = \pi_0(w_0, q) = \pi_0(w_1, p) = \pi_0(w_2, q) = t$ で、残りは f とする。すると、 $M_0, w_0 \models p \wedge q$ 、 $M_0, w_0 \models B_1 p$ 、 $M_0, w_0 \models B_2 q$ が成り立つ。しかし、 $M_0, w_0 \models B_1 q$ や $M_0, w_0 \models B_2 p$ は成り立たない。

さて、エージェント a の知識 (K_a) や信念 (B_a) は理想的には以下のような性質をもつと考えられる。

- 知識の正しさ: $K_a p \rightarrow p$ 。これは p が真であることを a が知っているならば p は真である、ということを表し、信念の場合は一般に成立しない。
- 正の内省: $B_a p \rightarrow B_a B_a p$ 。これは a が p を信じているならば、 a は自分が p を信じていると信じていることを表す。これは知識の場合も成り立つ。すなわち、 $K_a p \rightarrow K_a K_a p$ 。
- 負の内省: $\neg B_a p \rightarrow B_a \neg B_a p$ 。これは a が p を信じていなければ、 a は自分が p を信じていないと信じていることを表す。これも知識の場合に成り立つ。
- 整合性: $\neg B_a (p \wedge \neg p)$ 。これは a が矛盾を信じていないことを表す。また、知識の場合も同様に $\neg K_a (p \wedge \neg p)$ が成り立つ。

これらの性質を満足するには、知識 (K_a) の場合には R_a が反射性、推移性、対称性、継続性という性質を満たせばよく、信念 (B_a) の場合は R_a が推移性、ユークリッド性、継続性という性質を満たせばよいことが知られている [Chellas 80, Fagin 95] が、以後の議論には直接関係しないので、これらの説明は省略する。

2.2 木構造

様相論理式の実偽値は M, w というペアに対して決まるので、各エージェントの知識や信念を M, w に対応づ

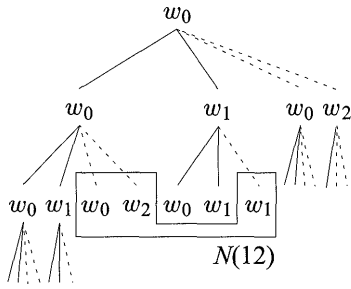


図2 Kripke モデル M_0 と可能世界 w_0 からできる木

けて考えよう。心的状態の変化は M, w を M', w' に変更することにより表せる。ところが、Alice が部屋に入るのを Bob が見たというような変化に伴う心的状態の変化を M, w の変更として表すのは難しい。それは一般の Kripke モデルを書き換える方法を記述するのが困難だからである。そこで、構造の変化を再帰的に定義しやすい木構造で Kripke モデルを置き換える方法が提案されている。

図1の Kripke モデル M_0 を使って説明しよう。 w_0 から R_1, R_2 で到達できるパスを考えると R_1 により w_0 と w_1 へ、 R_2 により w_0 と w_2 へ到達できる。したがって、 R_1 を実線の枝で、 R_2 を破線の枝で表すと図2の根の w_0 の下の四つの枝と子節点ができる。この各子節点から到達できる可能世界をさらに考えていくことで、図2のような無限木ができる。無限木の節点には対応する可能世界のラベルを、枝には通った R_i のエージェント i をラベルとして与える。

このようにしてできた木の根から、順に $l_1 l_2 \dots l_k$ というエージェントのラベルをもつ枝をたどってたどり着く先の節点の集合を $N(l_1 l_2 \dots l_k)$ で表そう。図2では $N(12)$ を実線で囲んで示している。そして $N(l_1 \dots l_k)$ に含まれている可能世界の集合を $W(l_1 \dots l_k)$ で表そう。 $W(1) = \{w_0, w_1\}$, $W(12) = \{w_0, w_1, w_2\}$ である。すると、 $M, w \models B_{i_1} \dots B_{i_k} \phi$ は、すべての $v \in W(l_1 l_2 \dots l_k)$ に対して $M, v \models \phi$ が成り立つことと等価になる。このように Kripke モデルを木構造に展開するアイデアは Fagin ら [Fagin 85] がより一般的な形で提案しており、また従来、対話の研究で「信念スペース」 [Allen 95] などと呼ばれていた概念に対応する。

2.3 木構造の変更

現実世界が w であるとき、エージェント a は w の候補として、 $V = \{v \mid w R_a v\}$ を考えている。現実世界が w から w' に変化すると、その変化の一部を観測したエージェント a は、 w' の候補として別の可能世界の集合を考えることになる。エージェント a が考えていた一つの可能世界 v に着目すると、 v の後継として、新しい情報と適合するもっともらしい可能世界をいくつか考えるであろう。そこで、この集合を $S_a(v)$ で表そう。すると、 a が w' の候補として考える可能世界の集合はこれらを

集めたもの $\cup_{v \in V} S_a(v)$ になる。

同じ処理を木構造で行うことを考えてみよう。説明を簡単にするため、根とそのすぐ下の子節点に制限した深さ2の木だけ考える。まず現実世界を表す根のラベルは w から w' に変わるはずである。そして、ラベル a の枝で根と接続された子節点のラベルが v なら、これを $S_a(v)$ の各要素に対応する新しい節点で置き換え、ラベル a の枝で根と結ぶ。もっと深い木も、同様の操作を再帰的に行うことで木を変換できる。

しかし、この変換方法には次の問題点がある。

- (1) 図2を見てわかるように、Kripke モデルと可能世界のペアを木構造で表すと、同じ可能世界が何度も繰り返され冗長性が高い。また、無限木は一般に計算機上で取り扱えない。
- (2) $S_a(v)$ をどう与えればよいか不明確である。
- (3) 変化が起きるごとに、根以外の各節点が一般に複数の節点に置き換わるので、木が急速に大きくなる可能性がある。

最初の問題点は、 $v R_a v$ に対応する枝を省略することで若干冗長性を軽減できる。また、様相記号が多段に入り組んだ複雑な論理式の真偽値を求める場合は少ないと考えて、適当な高さまでの有限木のみを考えることにする。二番目の問題点については2.6節で説明する。

三番目の問題点に関しては、前述の $S_a(v)$ に属する可能世界が複数になると、指摘した可能性が起り得る。そこで木が爆発するのを防ぐため、関連する節点を一つにまとめて、 $S_a(v)$ の要素数を少なくする対策が考えられる。我々は信念の推定において、3.1節で示すように、真と偽以外に「命題の真理値についての情報がない」という意味の第三の値を導入して節点を集約した。

2.4 部分様相論理

ここでは様相論理の3値への拡張である部分様相論理 [Thisse 96] について紹介する。「 p ですか?」という yes/no 型の質問に対する a の答えを考えると、様相論理では yes を $B_a p$ で、no を $B_a \neg p$ で、わからないを $\neg B_a p \wedge \neg B_a \neg p$ で表せるので、様相論理を3値に拡張するのは一見むだなように見える。しかし、これは a の信念を表しているだけであり、これらの式自体はあくまで2値である。様相論理の3値への拡張とは、これらの式の取り得る値を3値に拡張しようとするものである。したがって、 $B_a p$ のような式が真でも偽でもない、ということが起り得る。

正確には、まず各命題変数の取り得る値を3値に拡張する。すなわち、真理値割当て関数 $\pi: W \times P \rightarrow \{t, f, n\}$ とする。ここで n が3番目の真理値で「 p の真偽が不明」を表す。

3値論理では以下で定義される特殊な否定 (\sim) を導入できる。 $\sim \phi$ は直感的にいえば ϕ が真であるとはわかっていないことを表す。

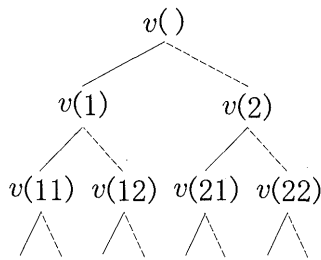


図3 部分様相論理に基づいた圧縮木

を一つの節点に置き換え、その節点のラベルには部分様相論理の状態 v を使い、真理値割当て $\tilde{\pi}$ は

- $\tilde{\pi}(v, p) = \text{t}$ iff $\forall w \in W (l_1 l_2 \dots l_k) : \pi(w, p) = \text{t}$
- $\tilde{\pi}(v, p) = \text{f}$ iff $\forall w \in W (l_1 l_2 \dots l_k) : \pi(w, p) = \text{f}$
- $\tilde{\pi}(v, p) = \text{n}$ iff 上記以外.

を用いる。例えば、図2は図3に変換され、 $\tilde{\pi}_1(v(12), p) = \tilde{\pi}_1(v(12), q) = \text{n}$ になる。なお、このような木の圧縮を行った結果、図1に示した M_0 では $M_0, w_0 \models B_1 B_2 (p \vee q)$ が成り立つのに対して、図3に対応する部分様相論理の Kripke モデル \tilde{M} では $\tilde{M}, v(\cdot) \not\models B_1 B_2 (p \vee q)$ になり、情報が失われていることがわかる。

次に、各可能世界の後継世界を決めるときに、エージェントは自分の信念を変更するだけでなく、それまでに自分の信念に基づいて計算した他人の信念の推定結果も変更すべきことがしばしばあるという事実に注目した。例えば、別の部屋にいたと思っていた Alice と Bob が出会えば、Bob は Alice の居場所に関する自分の信念を修正するだけでなく、Bob の状況を Alice が把握している、ということまで気づくであろう。つまり、Alice の新しい信念を Bob が推定する場合、ベースとなるのは、Alice の直前の信念に関する Bob の推定と、Bob が得た新しい情報である。この二つの情報を融合することにより、Alice の新しい信念が推定できる、と考えた。この考えでは、直前の信念状態と最新の入力だけから次の信念状態が決まるという一種のマルコフ性を仮定しており、昔の情報との整合性をあらためて考慮しないことで高速な計算を可能にしている。

また、後継の状態を決めるときには、与えられた環境についての知識(制約)をあらかじめ記述する必要がある。ここで部分様相論理の含意 \rightarrow を用いることにより、制約を柔軟に記述することが可能になる。例えば、「 p と q が同時に真になることはない」という制約を考えてみよう。通常の命題論理式では $\neg(p \wedge q)$ と表せるが、 p と q がともに真偽不明の場合、この式は真偽不明である。2値論理では、 p と q の真偽値により $2 \times 2 = 4$ 通りの場合に対応する。このように、2値論理は情報が少ない場合ほど考慮すべき場合の数が増えてしまう。3値論理による制約の記述は、これを避けるのに有効である。ただし、単純に $\sim(p \wedge q)$ と表すと、 p が真で q が真偽不明のときにも真になってしまう。この場合、 q は偽であることが明らかであり、この式は制約として弱すぎる。

そこで $(p \rightarrow \neg q) \wedge (q \rightarrow \neg p)$ という式を考えると、 p, q がともに真偽不明の場合には真であり、 p が真のときには q が偽のときにだけ真になるという好ましい性質をもつ。このように、3値論理を用いることで、制約の記述が柔軟になり、真偽不明の命題に深入りしない推論が可能になる。

3.2 知識の推定

木構造の書換えに基づいた知識の推定に関しては van der Meyden [Meyden 94] がその定式化を行った。ここでは次の仮定がなされている。

- (1) 環境は有限状態で表され、どの状態からどの状態へ遷移可能かあらかじめ決められている。そして各エージェントは皆この情報を知っている。
- (2) 各エージェントの観測能力に限りがあり、今観測している状態がどの状態か完全にはわからない。また、各エージェントが区別できる状態についての情報をどのエージェントも知っている。

この環境が状態遷移を繰り返した後に、各エージェントが他者の知識を正確に推定する問題を van der Meyden は 2.2 節と 2.5 節で述べた木構造とランモデルに基づいた様相論理のモデル検査の問題に置き換えた。すると、2.3 節で述べた後継世界の選択 ($S_a(v)$ の規定) は上の仮定で述べた遷移可能性と観測に関する条件から決まる。そして、同期システムの場合(すべてのエージェントが同じ時間に観測を繰り返す場合)には、このモデル検査の問題が状態遷移の回数に関して多項式時間で解けることを示した。

一方、この van der Meyden の方法によるモデル検査の時間計算量を状態の数に注目して解析すると、状態遷移の回数が増えるときに状態の数に関して最悪の場合指数オーダー以上の時間計算量が必要なことを梅村と勝野 [梅村 99] は示した。そして、3.1 節とは異なる木の圧縮方法を用いて、「知らない」という意味の論理式を考慮しない場合のモデル検査の問題を、状態遷移回数の線形時間、状態数の多項式時間で解けることを示した。なお、ここで用いた方法は信念の場合と違い通常の様相論理のもとで議論されている。

4. おわりに

本稿では、命題様相論理による知識・信念の表現と、定理証明からモデル検査へという推論方法の最近の変化について、著者の研究を中心に紹介した。これまでも述べたように、この方面の研究は発展途上であり、今後解決しなければならない問題が多い。

例えば、木構造に基づいた方法では共有知識・信念の扱いが難しいので、何らかの工夫が必要である。また、信念の推定では部分様相論理を用いて、木の大胆な圧縮を行ったが、その結果 p または q とか p ならば q など

の複数の命題に関連した信念の取扱いが制限されている。処理時間を増大させることなく、できる限り広い範囲の信念を取り扱えるようにすることも重要である。

本稿で示した論理的なアプローチとは異なり、信念をベイジアンネットワークなどの確率モデルで表すアプローチの研究も盛んに進められている [Pearl 88]。しかし、確率的なアプローチで他者の信念を取り扱う方法についての研究はまだ進んでいない。また、論理的なアプローチと確率的なアプローチには相補う面があるので、これらのアプローチをうまく統合して、より現実的な知識・信念推定法を考案していくことは今後に残された興味深い研究課題である。

謝 辞

研究を支援して下さった NTT コミュニケーション科学基礎研究所・石井健一郎所長に感謝します。また、第二著者は研究費を支援して下さった東京電機大学総合研究所にも深謝いたします。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Allen 95] Allen, J.: *Natural Language Understanding*, 2nd Ed., Benjamin Cummings (1995)
- [Appelt 85] Appelt, D. E.: *Planning English Sentences*, Cambridge University Press (1985)
- [Chellas 80] Chellas, B. F.: *Modal logic, an introduction*, Cambridge University Press (1980)
- [Fagin 85] Fagin, R. and Vardi, M. Y.: An Internal Semantics for Modal Logic, in *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 305-314 (1985)
- [Fagin 95] Fagin, R., Halpern, J. Y., Moses, Y. and Vardi, M. Y.: *Reasoning About Knowledge*, MIT Press (1995)
- [Friedman 94a] Friedman, N. and Halpern, J. Y.: A Knowledge-Based Framework for Belief Change, Part I: Foundations, in *Proceedings of the Fifth Conference on Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge*, pp. 44-64, Morgan Kaufmann (1994)
- [Friedman 94b] Friedman, N. and Halpern, J. Y.: A Knowledge-Based Framework for Belief Change, Part II: Revision and Update, in *Proceedings of the Fourth Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pp. 190-201, Morgan Kaufmann (1994)
- [Gärdenfors 88] Gärdenfors, P.: *Knowledge in Flux*, MIT Press (1988)
- [Groeneveld 95] Groeneveld, W.: *Logical Investigations into Dynamic Semantics*, ILLC Dissertation series, DS-1995-18 (1995)
- [Halpern 91] Halpern, J. Y. and Vardi, M. Y.: Model Checking vs. theorem proving: a manifesto, in *Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pp. 325-334, Morgan Kaufmann (1991)
- [Harabagiu 00] Harabagiu, S., Pasca, M. and Maiorano, S.: Experiments with Open-Domain Textual Question Answering, in *Proceedings of COLING-2000* (2000)
- [Isozaki 96] Isozaki, H. and Katsuno, H.: A Semantic Characterization of an Algorithm for Estimating Others' Beliefs from Observation, in *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 543-549, MIT Press (1996)
- [磯崎 97] 磯崎, 勝野: マルチエージェント環境における廻行的信念推定アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 3, pp. 429-442 (1997)
- [磯崎 99] 磯崎秀樹: マルチエージェント環境で他者の信念の変遷を推定する前端的アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 9, pp. 3358-3372 (1999)
- [Isozaki 00] Isozaki, H. and Katsuno, H.: Observability-based Nested Belief Computation for Multiagent Systems and Its Formalization, in *Intelligent Agents VI: Agent Theories, Architectures, and Languages*, No. 1757 in Lecture Notes in Artificial Intelligence, pp. 24-41, Springer-Verlag (2000)
- [Katsuno 92] Katsuno, H. and Mendelzon, A. O.: On the Difference between Updating a Knowledge Base and Revising It, in *Belief Revision*, pp. 183-203, Cambridge University Press (1992)
- [Katsuno 01] Katsuno, H. and Isozaki, H.: A Simplified Semantic Structure for Representing Belief States in Multi-agent Environments, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E84-D, No. 1, pp. 129-141 (2001)
- [賀沢 00] 賀沢, 加藤: 意味制約を用いた日本語質問解答システム, 情報処理学会研究報告, NL-140-26 (2000)
- [Konolige 86] Konolige, K.: *A Deduction Model of Belief*, Morgan Kaufmann Publishers (1986)
- [Konolige 88] Konolige, K.: Hierarchic Autoepistemic Theories for Nonmonotonic Reasoning: Preliminary Report, in Reinfrank, M., Kleer, de J., Ginsberg, M. L. and Sandewall, E. eds., *Proceedings of the Second International Workshop on Non-Monotonic Reasoning*, pp. 42-59, Springer-Verlag (1988)
- [Meyden 94] Meyden, van der R.: Common Knowledge and Update in Finite Environments. I (Extended Abstract), in *Proceedings of the Fifth Conference on Theoretical Aspects of Reasoning About Knowledge*, pp. 225-242, Morgan Kaufmann (1994)
- [Pearl 88] Pearl, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann Publishers (1988)
- [Thijsse 96] Thijsse, E.: Combining Partial and Classical Semantics. A Hybrid Approach to Belief and Awareness, in *Partiality, Modality, and Nonmonotonicity*, pp. 223-249, CSLI Publications (1996)
- [梅村 99] 梅村, 勝野: 動的環境におけるエージェント知識の効率的モデル検査法, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 11, pp. 4041-4054 (1999)

2001年7月10日 受理

著 者 紹 介



磯崎 秀樹 (正会員)

1983年3月東京大学工学部計数工学科卒業。1986年同大学院修士課程修了。同年NTT入社。博士(工学)。人工知能・自然言語処理の研究に従事。



勝野 裕文 (正会員)

1974年3月東京大学理学部数学科卒業。1976年同大学院修士課程修了。同年NTTに入社。同社コミュニケーション科学基礎研究所を経て、2000年10月より東京電機大学理工学部教授。博士(数理科学)。人工知能・データベースの研究に従事。