

非単調知識処理システム BMS†

森 馬 純 一†† 馬 場 口 登†† 手 塚 慶 一††

本論文では、完全な知識だけでなく不完全な知識も扱うことのできる新しい知識処理システム BMS を提案する。BMS は、命題論理式で表される完全な知識とオペレータ“ $\Rightarrow$ ”を用いて表される不完全な知識を受け取り、それらをもとに信念に基づく推論を行い、妥当な信念集合を得るという推論システムである。そのため、BMS は新しい知識の追加に伴い、以前に持っていた推論結果を取り消すこともあり、非単調推論を実現するシステムであるといえる。BMS の重要な機能としては、知識ベースを更新する機能および外部から与えられた質問に回答する機能が挙げられる。前者は、システムが与えられた知識に対する無矛盾で妥当な信念を常に保持することを可能とし、後者は、システムの持つ信念を外部から自由に参照することを可能とする。ここでは、この2つの機能を中心に BMS の構造、動作を説明する。また、非単調推論でしばしば問題となる複数の解の取り扱いについて BMS 上で議論し、一意に解を求める手法を提案する。さらに、BMS を非単調性を持つ既存システムである TMS, ATMS, THEORIST などと比較し、その差異を明らかにする。

1. ま え が き

人間が行っている様々な推論能力を知識処理システムに与えることは、将来の高度人工知能システムの実現に向けての重要な課題の1つである。現在のシステムが持つ推論能力はほぼ演繹推論の範囲に限られており、それは人間の推論の一側面に過ぎない。完全な知識とともにデフォルトや例外を含む知識など不完全な知識も対象とする非単調推論は演繹推論の枠組みを超える推論形態の1つである¹⁾。

非単調推論を定式化する論理の1つである自己認識論理 (Autoepistemic Logic)^{2)~4)}は、古典的論理に信念オペレータ“ L ”を導入することによって、エージェントの信念に基づく推論を定式化する論理である。自己認識論理は、意味論が明確であること、他体系に比べて理論的欠点が少ないなどの理由から、非単調推論を実現するのに有力な論理であると考えられており、多くの研究がなされている。

自己認識論理を含むこれまでの非単調推論研究を概観すると、理論よりのものが多く、その推論機能を知識処理に如何に反映させていくかや、外部とのインタラクションをどのようにとるかを示唆するシステムよりの研究が少なかった。そこで本論文では、自己認識論理を基礎に置く非単調知識処理システム BMS (Belief Management System) を提案する^{5)~7)}。BMS

は、完全な知識と不完全な知識を統合した知識ベースを操作することにより、非単調な推論を行うシステムであり、信念をも扱える点がその特徴と言える。BMS 設計においては、推論の非単調性が生じる要因となる信念の動的な推移を明確に把握したいという要求から、モデル論的なシステム設計思想を取る。

以下、本論文では、BMS についての概略、構成、動作、機能拡張、および評価について検討を加える。

2. 概略と特徴的機能

BMS は自己認識論理に基づく推論を具体化したシステムであるが、知識表現の面で以下の相違点がある。BMS では、自己認識論理の信念オペレータ“ L ”の代わりに、例外許容型の含意オペレータ“ $\Rightarrow$ ”を導入している。これにより L は見かけ上、知識表現に出現せず、完全な知識と不完全な知識を区別して簡明に記述できる。ただし、解釈・モデル等の意味論は自己認識論理に完全に準じている。

なお、BMS が対象とする言語クラスは命題である。フルセットの一階述言語を対象とすると計算上の理論的障壁が存在することが、非単調論理の問題として知られている¹⁾。命題が計算できる安全なクラスであることが、その選択理由である。

図1に BMS の構成を示す。知識ベース部 KB (Knowledge Base) は論理式ベース FB (Formula Base)、信念ベース BB (Belief Base)、可能世界ベース WB (World Base) からなる3層構造を持つ。信念管理部 BM (Belief Manager) は、知識ベースを更新し無矛盾性を維持するもので、BMS の中核的役割を担っている。また質問応答部 QAM (Query and

† BMS: Belief Management System—A System for Nonmonotonic Knowledge Processing by JUN-ICHI MORIUMA, NOBORU BABAGUCHI and YOSHIKAZU TEZUKA (Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University).

†† 大阪大学工学部通信工学科

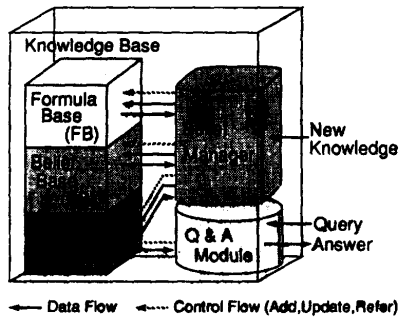


図1 システム構成
Fig. 1 System configuration.

Answer Module) は、BMS に対する質問、応答機構を司る。

前述のように、BMS は自己認識論理の可能世界意味論³⁾に立脚したモデル論的システム構成を取っている。すなわち、BB には BMS のもつ信念が、また WB には推論結果が各々自然な形で記述される。さらに BM は、無矛盾な解釈を見つけるよう知識ベースを操作するモジュールと考えることもできる。

BMS の特徴的機能は次の2つに集約される。

- (1) 新しい知識の追加に伴い、知識ベースを更新し、矛盾が生じた場合、それを解消する。
- (2) 外部から命題論理式の形で与えられる質問に対し、柔軟な答を返す。

(1)は、ある時点で持っている知識に対する無矛盾な推論結果を常に持ち続けうることを意味する。無矛盾性の維持とは、それが崩れたとき新たに無矛盾な結果を再構成することに相当し、ここでは筆者らの提案した拡張世界（推論結果）構成アルゴリズム⁴⁾を BMS 向きに修正して利用している。(2)は、システムの持つ信念を自由に参照できることに加えて、推論結果が完全な知識のみで得られるか、不完全な知識も介在して得られるのかを識別できることを示す。よって従来の知識処理システムのように、単に Yes/No の真偽を返すだけでなく、信念の確かさに応じた5通りの答を返すことができる。

3. システム構成

3.1 知識ベース部 KB

3.1.1 論理式ベース FB

BMS は論理に基づく知識表現をとるので、対象とする式を最初に定義する。BMS が受理する2種類の式として、通常式 (ordinary formula) およびデフォルト式 (default formula) を定める。通常式は命題論

理式で表されるもので、完全な知識、事実を表す。デフォルト式は、例外を含む知識など不完全な知識を表す式で、その表現にはオペレータ “ $\Rightarrow$ ” を用いる。そして $\alpha \Rightarrow \beta$ という式には「 α ならば普通 β である」という非形式的な意味を与えるが、ここでは α と β が通常式であるものに限定する。デフォルト式 $\alpha \Rightarrow \beta$ は、自己認識論理における $L\alpha \wedge \neg L\neg\beta \rightarrow \beta$ と同義である ($\neg$, $\rightarrow$, $\wedge$ は各々否定, 含意, 連言記号)。

さて FB は、現時点までにシステムに与えられた式を保存する部分であり、式の種類に応じて通常式ベース OFB とデフォルト式ベース DFB に区別して格納される。したがって FB は次のように記述できる。

$$FB \triangleq OFB \cup DFB$$

$$OFB \triangleq \{o_1, \dots, o_i\}$$

$$DFB \triangleq \{d_1, \dots, d_i\}$$

ただし、 o_i , d_i は各々通常式、デフォルト式を表す。また、以下の説明のため次の集合 B , C を定義する。

$$B \triangleq \{\alpha | \alpha \Rightarrow \beta \in DFB\} \cup \{\neg\beta | \alpha \Rightarrow \beta \in DFB\} \\ \triangleq \{b_1, \dots, b_n\}$$

$$C \triangleq \{c | c \text{ は FB の各式に現れる命題定数}\} \\ \triangleq \{c_1, \dots, c_n\}$$

3.1.2 信念ベース BB

デフォルト式 $\alpha \Rightarrow \beta$ の真偽は、信念管理部 BM が α および $\neg\beta$ をそれぞれ信じているかどうかによって依存する。したがって、集合 B は DFB のすべてのデフォルト式を解釈するのに必要な式集合である。実際 BMS は、 B の各式に対する信念を仮定することによって得られる推論結果が、その仮定と矛盾しないかを調べるという方法により推論を実現している。その信念の仮定を記述する部分が BB である。

BB には、 B に含まれる式と各式に対する信念の仮定を示す3つのラベルが記述される。

valid : 常に正しいことを示す。

positive : 信じていることを示す。

negative : 信じていないことを示す。

B の各式に上の3つのラベルを与えること（信念ラベル割当と呼ぶ）は、論理式への真理値割当と同等であり、 b_i が **positive**, **negative** と信念ラベル割当されることは、自己認識論理において Lb_i , $\neg Lb_i$ を真であると真理値割当することに等しい。

さて **valid** は「信じている」という意味を強調した「必ず成り立つ」という意味を持ち、基本的な扱いは **positive** と同様である。**valid** と **positive** との相違点は、**positive** が今後 **negative** または **valid** に変更

される可能性があるのに対し, valid は今後更新の際にも不変であるという点である. また, 同様に negative は valid または positive に変更される可能性を持つ. よって, 知識の増加に伴い, valid が与えられる式は単調に増加し, positive, negative が与えられる式は非単調に増減することになる. valid を導入した目的は, 主に探索の効率化, すなわちラベル変更の際の組合せを減らすことにある.

BB は, 以下のように B の各要素 b_i とそのラベル $\text{blab}(b_i)$ との組の集合により記述できる.

$$\text{BB} \triangleq \{(b_i, \text{blab}(b_i)) | i=1, \dots, k\}$$

$$b_i \in B$$

$$\text{blab}(b_i) \in \{\text{valid}, \text{positive}, \text{negative}\}$$

3.1.3 可能世界ベース WB

BMS は, 推論結果を可能世界集合という形で求める. 可能世界 (単に世界と呼ぶこともある) とは, BM が想定する様々な状況に相当する概念であり, ここでは各命題定数への真理値割当によって表す.

WB は推論結果を, 成り立つ式の集合である可能世界集合として保持する部分であり, OFB の全式を真とするすべての真理値割当が世界として記述される.

各世界には in または out のラベルが与えられ, それぞれ以下のような意味を持つ.

in : その世界が信念に合致していると BM が判断している.

out : その世界が信念に合致していないと BM が判断している.

このラベルは, デフォルト式の真偽を定める BMS 解釈の下で DFB の全式が真となる世界には in, そうでない場合には out と定められる. なお, BMS 解釈については次節で議論する.

WB は, 世界 w_i とそれらへのラベル $\text{wlab}(w_i)$ との組の集合により記述される. すなわち,

$$\text{WB} \triangleq \{(w_i, \text{wlab}(w_i)) | i=1, \dots, m\}$$

$$\text{wlab}(w_i) \in \{\text{in}, \text{out}\}$$

と記述され, 世界 w_i は集合 C の要素 c_j とその真理値割当 $v_{i,j}$ との組の集合で記述される.

$$w_i \triangleq \{(c_j, v_{i,j}) | j=1, \dots, n\}$$

$$v_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad c_j \in C$$

$v_{i,j}=0, 1$ はそれぞれ w_i において c_j が偽, 真であることを表す. ただし, $m \leq 2^n$ である. また集合 W , W_{in} を次のように定める.

$$W \triangleq \{w_1, \dots, w_m\}$$

$$W_{in} \triangleq \{w | w \in W, \text{wlab}(w)=\text{in}\}$$

FB	OFB	$O_1, O_2, \dots, O_s$				
	DFB	$d_1, d_2, \dots, d_t$				
BB	b_1	$\text{blab}(b_1)$				
	b_2	$\text{blab}(b_2)$				
	$\vdots$	$\vdots$				
	b_k	$\text{blab}(b_k)$				
WB		C_1	C_2	$\dots$	C_n	Label
	$w_1 =$	$\langle v_{1,1}$	$v_{1,2}$	$\dots$	$v_{1,n}$	$\text{wlab}(w_1)$
	$w_2 =$	$\langle v_{2,1}$	$v_{2,2}$	$\dots$	$v_{2,n}$	$\text{wlab}(w_2)$
	$w_m =$	$\langle v_{m,1}$	$v_{m,2}$	$\dots$	$v_{m,n}$	$\text{wlab}(w_m)$

図 2 知識ベースの表現型式

Fig. 2 Representation scheme of knowledge base.

W_{in} は現在持つ論理式ベース FB に対する BM の信念全体を表す可能世界集合と見なせる.

以上で定義した記号を用いると, BMS の知識ベースは図 2 のように表される.

3.2 信念管理部 BM

BM は, 知識ベース KB の状態を管理しつつ, 推論を行うと共に, 新しい知識が追加されたとき, KB を更新し, 無矛盾性を維持する. 本節では, BM の動作の基礎を形成する BMS 解釈, ならびに KB の無矛盾性を定義する. 続いて, BM が具備する無矛盾性維持のための知識ベース更新アルゴリズムを示す.

3.2.1 BMS 解釈と KB の無矛盾性

WB の各世界に付けられるラベルは, その世界における真理値割当, および BB に含まれる各式への信念ラベル割当によって決定される. まず, BMS 解釈なるデフォルト式に対する解釈を以下に定義する.

定義 1 (BMS 解釈) 世界 $w (\in W)$ に対して, 以下の条件を満たすデフォルト式 $\alpha \Rightarrow \beta$ への真理値割当および信念ラベル割当を w における BMS 解釈 $I(w)$ と呼ぶ.

• $\text{blab}(\alpha) = \text{valid}$ または positive , $\text{blab}(\neg\beta) = \text{negative}$, かつ w で β が偽であるとき, またそのときに限り $\alpha \Rightarrow \beta$ が偽である. ■

次に, 世界へのラベル付けを定義する.

定義 2 (世界へのラベル付け) 世界 w に対して, DFB の全式が $I(w)$ で真となると, $\text{wlab}(w) = \text{in}$ とし, そうでないとき, $\text{wlab}(w) = \text{out}$ とする. ■

上の定義より, WB で in とラベル付けされる世界は, OFB および DFB を共に充足することが分かる. W_{in} で真となる式の集合がシステムの持つ信念全体と見なされるが, それが無矛盾なものであるためには, KB が以下の条件を満たす必要がある.

定義 3 (KB の無矛盾性)

(i) $W_{in} \neq \emptyset$.

(ii) $\text{blab}(b_i) = \text{valid}$ または positive であるとき, W_{in} のすべての世界で b_i が真である.

(iii) $\text{blab}(b_i) = \text{negative}$ であるとき, W_{in} の少なくとも1つの世界で b_i が偽である.

を満たすとき, またそのときに限り, KB が無矛盾であるという. ■

定義3は, BB における信念ラベル割当が, W_{in} で表される信念集合に合致するかどうかを検証するための条件であり, これらを満たさないとき, 信念と推論結果との間に食い違いが生じていること, 換言すれば BMS の KB は矛盾していることになる.

ここで, KB が無矛盾な状態にあるということが論理的にいかなる意味を持つかについて考察しよう. 定義1, 2, 3から, 以下の命題1⁶⁾を得る.

命題1 無矛盾な知識ベースを持つ BMS に対して, W_{in} の全世界で真となる式集合 T は,

$$T = \text{Th}[\text{OFBU} \{ \beta | \alpha \Rightarrow \beta \in \text{DFB}, \\ \alpha \in T, \neg \beta \in T \}] \quad (1)$$

を満たす. ■

なお, (1)式における Th は論理的帰結集合を表すオペレータである. 上の命題は, 知識ベースが無矛盾であるときの BMS が持つ信念集合を定めるものであり, (1)式を満たす T を BMS における FB の拡張世界 $\text{Ex}[\text{FB}]$ (extension) と呼ぶ. この拡張世界という概念は, 自己認識論理における安定拡張世界 (stable expansion)²⁾ に相当するものであると考えられ, 与えられた式集合に対する無矛盾で妥当な推論結果と見なすことができる.

以上より, 無矛盾な KB の状態を求めることは, 拡張世界を構成していることと同義であり, それによって, システムは与えられた式集合に対する妥当な推論結果を得るといえる. なお自己認識論理で, 1つの前提に対して複数の安定拡張世界が存在することがあるように, BMS に関しても1つの無矛盾な FB に複数の拡張世界, すなわち複数の無矛盾な KB の状態が存在しうる. ところが, 自己認識論理の場合とは異なり, 無矛盾である前提に対して拡張世界が存在しない場合はありえないことが保証されている^{6), 7)}.

3.2.2 知識ベース更新アルゴリズム

BMS では, 新しい知識が加えられたとき, KB を更新し, かつ無矛盾性を維持する機構を BM に持たせている. これは, 追加された式を満たすよう信念を変更し, かつ定義3の無矛盾性が崩れたときにそれを解消する機能であり, これにより, 常に BMS は与え

られた式集合に対する拡張世界, すなわち無矛盾な推論結果を持ち続けることができる.

以下にアルゴリズムを記す. 説明に用いる各記号は, 前節までの定義に従い, 特に断りがない限り手続きは番号の順に行われるものとする.

【知識ベース更新アルゴリズム】

- (1-1) 新たに与えられた式を ω とする.
- (1-2) ω が $c \in C$ なる命題定数 c を含んでいるならば (1-3)へ, 含んでいなければ (2)へ.
- (1-3) $C \triangleq C \cup \{c\}$ とし, 次のように WB を拡張し, (1-2)へ.
 - a) $W = \phi$ のとき, $w^- \triangleq \{(c, 0)\}$, $w^+ \triangleq \{(c, 1)\}$, $\text{wlab}(w^-) = \text{wlab}(w^+) = \text{in}$, $W \triangleq \{w^-, w^+\}$.
 - b) $W \neq \phi$ のとき, W に含まれるすべての w_i に対して, $w_i^- \triangleq w_i \cup \{(c, 0)\}$, $w_i^+ \triangleq w_i \cup \{(c, 1)\}$, $\text{wlab}(w_i^-) = \text{wlab}(w_i^+) = \text{wlab}(w_i)$, $W \triangleq W \cup \{w_i^-, w_i^+\}$.
- (2) ω が通常式ならば (3-1)へ, デフォルト式ならば (4-1)へ.
- (3-1) $\text{OFB} \triangleq \text{OFB} \cup \{\omega\}$.
- (3-2) $W \triangleq W - \{w | w \in W, \text{かつ } w \text{ の真理値割当が } \omega \text{ を充足しない}\}$. この結果 $W = \phi$ ならば, FB (OFB) が矛盾であることを知らせ終了する.
- (3-3) BB において, $\text{blab}(b_i) \neq \text{valid}$ である各 b_i が, WB の全世界で真となるとき, $\text{blab}(b_i) = \text{valid}$ とする.
- (3-4) 定義2に従って WB の各世界のラベルの付け替えを行い (5-1)へ.
- (4-1) $\text{DFB} \triangleq \text{DFB} \cup \{\omega\}$. (ω を $\alpha \Rightarrow \beta$ とする)
- (4-2) $\alpha \in B$ ならば, $B \triangleq B \cup \{\alpha\}$ とし, $\text{blab}(\alpha)$ を以下のように定める.
 - a) α が W の全世界で真ならば, valid .
 - b) α が W_{in} の全世界で真ならば positive .
 - c) それ以外の場合 negative .
- (4-3) $\neg \beta$ について (4-2)と同様の操作を行う.
- (4-4) 定義2に従って WB の各世界のラベルの付け替えを行い (5-1)へ.
- (5-1) 定義3により KB が無矛盾かどうかを調べ, 無矛盾ならば (6)へ, そうでなければ (5-2)へ.
- (5-2) BB において, negative あるいは positive のラベルを持つ式に対して, 以前と同一でない negative , positive のラベルの組合せ

の1つとなるように、ラベルを変更する。

(5-3) 定義2に従って、WB の各世界のラベルを変更し、(5-1)へ。

(6) 動作を終了する。 ■

ここで、本アルゴリズムの各ステップについて説明を加える。(1-3)では、加えられた式が BMS にとって新しい命題定数を含むとき、それらも対象とした WB を再構成する。(3-2)では、WB の全世界が OFB のモデルとなるように世界の削除を行う。BMS は OFB の全式を満たす世界を WB に持ち続けることになる。(3-3)では、新しい通常式の加入により、恒真となる $b \in B$ を発見し、valid とラベル変更する。このステップにより、後の BB のラベル変更の際に対象となるラベルの数を減らすことが可能で、効率化を図ることができる。(3-4)、(4-4)、(5-3)では定義2に従った適正なラベル付けを行う。また、(4-2)、(4-3)では、デフォルト式の前件部と後件部の否定を BB に記し、仮のラベルを与える。この操作は BMS 解釈を行うのに必要となる。(5)以下は、信念を変更することにより無矛盾状態を発見する部分である。

本アルゴリズムにより、ある無矛盾な FB に対する1つの拡張世界（無矛盾状態）を得ることが可能である。しかし、複数の拡張世界が理論的に存在する場合、そのいずれを最終状態とするかは、式が与えられた順序やアルゴリズムにおける BB のラベル変更の順序等に依存するため、不確定である。このことに関しては、5章で検討を加えることにする。

3.3 質問応答部 QAM

QAM は外部から BMS への質問に対して適切な応答を行う。質問に対して BMS は、次の5種類の応答、すなわち、true/false/perhaps true/perhaps false/unknown のいずれかを返すことができる。これらは KB の状態に応じて出されるもので、BMS の持つ信念の確かさを表現する。BMS はある式が、完全な知識のみで求められるのか、あるいは完全、不完全両方の知識から求められるのかを識別できるので、このような柔軟な応答機能を有するわけである。

それでは、BMS の KB の状態と応答との対応関係を以下に定義しよう。

定義4 (BMS の応答) BMS はその知識ベースの状態に応じ、通常式で与えられる質問 X に対して以下の応答を行う。

- (i) W のすべての世界で X が真ならば true.
- (ii) W のすべての世界で X が偽ならば false.

(iii) (i)の条件を満たさず、 W_{in} のすべての世界で X が真ならば perhaps true.

(iv) (ii)の条件を満たさず、 W_{in} のすべての世界で X が偽ならば perhaps false.

(v) (i)~(iv)以外ならば, unknown. ■

ここで、BMS の質問応答機構を論理的に説明する。 W は OFB を真とするすべての解釈、すなわち全モデルであるから、 W の全世界で X が真となることは、 X が OFB の論理的帰結であることと等価である。また知識ベースが無矛盾ならば、 W_{in} の全世界で X が真となることは、 X が FB の拡張世界に含まれることと同値である。BMS の応答をまとめると、以下のようになる。

- (i) true : $X \in \text{Th}[\text{OFB}]$
- (ii) false : $\neg X \in \text{Th}[\text{OFB}]$
- (iii) perhaps true : $X \in \text{Th}[\text{OFB}]$,
 $X \in \text{Ex}[\text{FB}]$
- (iv) perhaps false : $\neg X \in \text{Th}[\text{OFB}]$,
 $\neg X \in \text{Ex}[\text{FB}]$
- (v) unknown : $X \in \text{Ex}[\text{FB}]$,
 $\neg X \in \text{Ex}[\text{FB}]$

ここに、 $\text{OFB} \subseteq \text{Th}[\text{OFB}] \subseteq \text{Ex}[\text{FB}]$. これより、質問 X に対して true あるいは false と返答するのは、完全な知識のみから X あるいは $\neg X$ が導かれる場合に相当し、perhaps true または perhaps false と返答するのは、 X あるいは $\neg X$ が不完全な知識をも用いて導かれる場合に相当する。

4. 動作例

本章では、BMS の各動作の具体例を挙げ、知識ベース更新アルゴリズムの適用例を示す。

初期状態として、

FB = {bird (Tweety),
penguin (Tweety) $\rightarrow$ $\neg$ fly (Tweety),
penguin (Tweety) $\rightarrow$ bird (Tweety),
bird (Tweety) $\Rightarrow$ fly (Tweety)}

が与えられたときの BMS の状態を図3に示す。図3の状態では、 $W_{in} = \{w_3\}$ であることから、 w_3 の真値割り当てで真となる式、例えば $\neg$ penguin(Tweety), fly (Tweety) がシステムの信念に含まれるといえる。この状態に penguin (Tweety) という式が加えられた場合の知識ベース更新アルゴリズムの動作を示す。

$C = \{\text{bird (Tweety), penguin (Tweety),}$
fly (Tweety)\},

FB	OFB	penguin(Tweety) $\rightarrow$ $\neg$ fly(Tweety) penguin(Tweety) $\rightarrow$ bird(Tweety) bird(Tweety)		
	DFB	bird(Tweety) $\Rightarrow$ fly(Tweety)		
BB	bird(Tweety) : valid $\neg$ fly(Tweety) : negative			
WB	fly (Tweety)	penguin (Tweety)	bird (Tweety)	Label
	(0	1	1)	out
	(0	0	1)	out
	(1	0	1)	in

w1

out

w2

out

w3

in

図 3 初期状態
Fig. 3 Initial state.

$B = \{\text{penguin}(\text{Tweety}), \neg \text{fly}(\text{Tweety})\}$.

- (1-2) penguin(Tweety) は $c \in C$ なる命題定数 c を含んでいないので (2) へ。
 (2) penguin(Tweety) は通常式なので (3-1) へ。
 (3-1) OFB に penguin(Tweety) を加える。
 (3-2) WB から w_2 と w_3 を消去する。
 (3-3) BB における $\neg \text{fly}(\text{Tweety})$ のラベルを valid と変更。
 (3-4) w_1 のラベルを in とし、(5-1) へ。
 (5-1) 無矛盾性の条件を満たすので (6) へ。
 (6) 動作終了。

この最終状態を図 4 に示す。システムが最初 $\neg \text{penguin}(\text{Tweety})$ を信じていたのに対し、penguin(Tweety) という事実が加えられたため、そのままでは矛盾を生じる。そこでシステムは BB における信念の仮定、すなわち $\neg \text{fly}(\text{Tweety})$ を信じていないということを変更することによって、無矛盾な状態を取り戻す。

次に質問応答の例を示す。現在の状態を図 3 とする。このとき、bird(Tweety) という質問が与えられた場合、定義 4 の条件 (i) に適うため true と返答

FB	OFB	penguin(Tweety) $\rightarrow$ $\neg$ fly(Tweety) penguin(Tweety) $\rightarrow$ bird(Tweety) bird(Tweety) penguin(Tweety)		
	DFB	bird(Tweety) $\Rightarrow$ fly(Tweety)		
BB	bird(Tweety) : valid $\neg$ fly(Tweety) : valid			
WB	fly	penguin	bird	Label
	(Tweety)	(Tweety)	(Tweety)	
	(0	1	1)	in

図 4 更新後状態
Fig. 4 Updated state.

し、fly(Tweety) という質問が与えられた場合、条件 (ii) に適うため perhaps true と返答する。次に図 4 の状態を考えよう。このとき、bird(Tweety) という質問に対しては true と答えるが、fly(Tweety) に対しては false と返答する。これは元の信念が新しい知識の追加により変更されたことを示しており、BMS が非単調性を持つことが分かる。

5. 複数の拡張世界の取り扱い

BMS では 1 つの無矛盾な FB に対して複数の無矛盾状態が存在することがあり、また、BMS が最終的にどの状態を得るかは不確定であることは既に述べた。このことは、非単調推論における多重拡張世界問題 (multiple extension problem)¹⁾ に等しいものである。具体例を挙げると、BMS の FB が $\{p, p \Rightarrow q, p \Rightarrow \neg q, q \Rightarrow r, q \Rightarrow \neg r\}$ であるとき、図 5 に示す 3 つの無矛盾状態が存在する。しかし上述のように、3 つの内のいずれを選択するかは不確定である。

以下では、多重拡張世界問題への対処法として、各デフォルト式に優先順位を与える方策を議論する。本方策の目的は、優先度の高い拡張世界に相当する唯一解を一意に得ることにある。

BB	p	:	valid	
	q	:	positive	
	$\neg$ q	:	negative	
	r	:	positive	
	$\neg$ r	:	negative	
WB	p	q	r	Label
	(1	1	1)	in
	(1	1	0)	out
	(1	0	1)	out
	(1	0	0)	out

BB	p	:	valid	
	q	:	positive	
	$\neg$ q	:	negative	
	r	:	negative	
	$\neg$ r	:	positive	
WB	p	q	r	Label
	(1	1	1)	
	(1	1	0)	
	(1	0	1)	
	(1	0	0)	

BB	p	:	valid	
	q	:	negative	
	$\neg$ q	:	positive	
	r	:	negative	
	$\neg$ r	:	negative	
WB	p	q	r	Label
	(1	1	1)	
	(1	1	0)	
	(1	0	1)	
	(1	0	0)	

図 5 $FB = \{p, p \Rightarrow q, p \Rightarrow \neg q, q \Rightarrow r, q \Rightarrow \neg r\}$ とした場合の 3 つの無矛盾状態

Fig. 5 Three consistent states for $FB = \{p, p \Rightarrow q, p \Rightarrow \neg q, q \Rightarrow r, q \Rightarrow \neg r\}$.

初めにデフォルト式に関する諸定義を行う。

定義5 (デフォルト式集合の階層化) デフォルト式集合 D に含まれる任意の2要素 d_1, d_2 について優先順位が定められているとき, D は階層化されているという。また d_1 が d_2 より優先順位の高いとき (優先するとき), $d_1 < d_2$ と書く。

定義6 (デフォルト式の最小性) 階層化されたデフォルト式集合 D において, デフォルト式 d が, $\forall k, d_k \in D - \{d\}$ なるデフォルト式に対して, $d < d_k$ であるとき, d は D で最小であるといい, $\min[D] = d$ と表す。

次に, BMS において, どのデフォルト式を用いて無矛盾な状態 (推論結果) を求めたかということに関するデフォルト式の有効性を定義し, それをもとに, 複数存在しうる無矛盾状態の優先度を定める。

定義7 (デフォルトの有効性) BMS の無矛盾な知識ベースの状態を Σ とする。このとき, DFB の任意のデフォルト式 $\alpha \Rightarrow \beta$ について, α, β がともに W_{in} で真となると, $\alpha \Rightarrow \beta$ は Σ で有効であるという。 Σ で有効となる DFB のデフォルト式の集合を, Σ の有効デフォルト集合と呼ぶ。

定義8 (無矛盾状態の優先度) 階層化された DFB をもつ FB に対して, 無矛盾な知識ベースの状態が複数存在するものとする。任意の2つの状態 Σ_1, Σ_2 の有効デフォルト集合 E_1, E_2 について,

$$\min[\{d \mid d \in E_1, d \notin E_2\}] \\ < \min[\{d \mid d \in E_2, d \notin E_1\}]$$

であるとき, またそのときに限り, Σ_1 は Σ_2 に優先するといい, $\Sigma_1 < \Sigma_2$ と記す。

定義9 (最優先無矛盾状態) 階層化された DFB をもつ FB に対する BMS の知識ベースの状態 Σ が, 同じ FB に対する他のすべての無矛盾状態 Σ_k について $\Sigma < \Sigma_k$ であるとき, Σ を FB に関する最優先無矛盾状態 $\Sigma_{\min}$ という。

このように, デフォルトに優先順位を与えることにより, 最優先無矛盾状態が決定できる。そこで, この最優先無矛盾状態を得るよう 3.3 節で述べた知識ベース更新アルゴリズムを変更する。

【拡張知識ベース更新アルゴリズム】

((1)~(4)は元のアルゴリズムと同じ)

(5) KB の状態を Σ_0 と表し, $\Sigma_{\min} \triangleq \phi, k \triangleq 0$ とおく。

(6) 定義3により, KB の状態 Σ_k の無矛盾性を調べる。無矛盾ならば, (7)へ。そうでない

ならば, (8-1)へ。

(7) $\Sigma_{\min} = \phi$ または $\Sigma_k \ll \Sigma_{\min}$ (定義8参照) ならば, $\Sigma_{\min} \triangleq \Sigma_k$ とし, (8-1)へ。

(8-1) BB において, negative あるいは positive のラベルを持つ式に対して, $\Sigma_j, (0 \leq j \leq k)$ と異なる negative, positive のラベルの組合せが存在するかどうかを調べる。存在するとき, 上の条件を満たすラベルの組合せの1つとなるようにラベルを変更し, (8-2)へ。存在しないとき, $\Sigma_{\min}$ を KB の状態とし, 終了する。

(8-2) 定義2に従って, WB の各世界のラベルを変更し KB の状態を変化させる。 $k \triangleq k+1$ とし, (6)へ。

拡張アルゴリズムでは, すべての BB のラベルの組合せについて, 無矛盾な状態が得られるかを探索し, 無矛盾状態をすべて発見する。それらの中から最終状態となる最優先無矛盾状態を決定する。

図5の例, すなわち $FB = \{p, p \Rightarrow q, p \Rightarrow \neg q, q \Rightarrow r, q \Rightarrow \neg r\}$ においては, 同図(a), (b), (c)で表される3つの無矛盾状態 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ が発見される。このとき, これらの有効デフォルト集合はそれぞれ,

$$E_1 = \{p \Rightarrow q, q \Rightarrow r\} \\ E_2 = \{p \Rightarrow q, q \Rightarrow \neg r\} \\ E_3 = \{p \Rightarrow \neg q\}$$

である。仮に DFB の4つのデフォルト式に,

$$p \Rightarrow q < p \Rightarrow \neg q < q \Rightarrow r < q \Rightarrow \neg r$$

なる順位が付けられている場合, 上の諸定義から, その優先順序は $\Sigma_1 < \Sigma_2 < \Sigma_3$ とされ, Σ_1 が最優先無矛盾状態 $\Sigma_{\min}$ となり, これが最終状態となる。明らかに, これは各無矛盾状態の発見順序には無関係であり, 一意に求められる。

3章で行った議論では, 複数の無矛盾状態が存在しうる場合, そのいずれを最終状態とするかは不確定であったのに対し, DFB の各デフォルト式に優先順位を与えることにより, 一意に優先度の高い無矛盾状態を得ることが可能となる。ただし, 本手法では, デフォルト式の優先順位を何らかの形で決めることが大前提になる。ここで, 優先順位を情報の抽象度により決めるものと仮定すると, 優先順位を自動的に決める場合に, a) 階層が明らかな場合, $\{p \Rightarrow q < q \Rightarrow r\}$, b) 前件が強化される場合, $\{p \wedge q \Rightarrow r < p \Rightarrow s\}$ が考えられる。しかし, これらはあくまでも特別な場合であって, 一般的にはユーザが直観的に決める以外の手

ではないであろう。

なお、デフォルト式に優先順位を考慮する他手法に Brewka によるものがある⁹⁾。本手法が、すべてのデフォルト式の間に優先順位を定義しているのに対し、彼の手法は、デフォルト式の優先関係を半順序で定義している。すなわち、デフォルト式集合を部分集合に分割し、部分集合間の優先順位を認めるものの、部分集合内のデフォルト式間の優先順位は考慮しないというものである。彼の手法は、筆者らのものに比べて、より現実世界に適合した、自然な定式化になっているが、同じクラスのデフォルト式の適用順序により複数の同等の拡張世界が得られる場合がある。いわゆる、解の唯一性、一意性は保証されない。筆者らの提案は解の唯一性、一意性の追求が主眼となっており、Brewka の手法とはねらいが異なっている。

6. 他システムとの比較

本章では、BMS と他の非単調性システムである Doyle の JTMS⁹⁾、de Kleer の ATMS¹⁰⁾、Poole の THEORIST¹¹⁾ と種々の観点から比較検討する。

第1に、システムが取り扱う言語のクラスを考える。JTMS, ATMS, BMS は何れも、システム内部でのデータは命題である。一方、THEORIST は変数を含む一階述語言語を取り扱っている。しかしながら、THEORIST も一階述語言語のすべての範囲を対象とするのではなく、デフォルト式に基礎例の代入のみを考慮するなど、計算可能な範囲に限定している。

第2に、知識の表現法について考える。BMS と THEORIST は例外を含むデフォルト知識「 p ならば普通 q である」を、直接的に論理式 $p \Rightarrow q$ で表現する。これにより完全な知識と不完全な知識との区別が明確になる。ちなみに BMS と THEORIST との知識表現上の違いを挙げると、後者は推論制御のために、default・fact・constraint などのメタ表現を導入している。BMS ではこのような表現は不必要であり、より平明な表現となっている。一方 JTMS, ATMS は、データ表現形式が統一化されており、データの状況によって種々の知識が表現される。例えば JTMS では前述の知識を、justification (結論ノード、IN リスト、OUT リスト) として $(q, \{p\}, \{\neg p\})$ で表せる。

第3に、推論形態を考察する。JTMS と ATMS は、ノード (命題) に対する真理値割当や信念割当、ならびに依存指向型バックトラッキングや年代順バッ

クトラッキングなどの手続きを併用する推論形態をとる。BMS は、BB や WB へのラベル割当とその解釈が中心となっており、モデル論的な推論である。THEORIST は、定理証明に基づく PROLOG によるインタプリタが開発されており、その推論形態は証明論的といえる。

最後に、システムの目的について考える。JTMS や ATMS は通常、問題解決器に付随して利用され、主に知識管理を担っている。BMS と THEORIST は、推論 (問題解決) と知識管理の両面をサポートするため、自身で1つの知識処理システムとなり得る。

以上を総合すると、BMS は THEORIST に最も近いシステムと見ることができる。現段階では、対象言語のクラスおよび推論の効率面から、THEORIST の方が優れているといえよう。この点は、BMS が信念の動的推移を容易に把握できるように構成されていること、すなわちモデル論的に構成されていることに起因する。しかしモデル論的なシステムでは、信念の状況を瞬時に参照できることが利点となる。したがって、質問に対する応答が、完全あるいは不完全な知識から得られたのかを容易に識別でき、この機能は THEORIST にはない独自のものである。また、BMS を THEORIST と同等に一階述語の範囲に拡張することは重要な課題であり、現在改良を進めている。

7. インプリメンテーションと評価

BMS を Common Lisp により Sun 4 ワークステーション上にインプリメントした。本章では、3.2 節で示した知識ベース更新アルゴリズムの実行時間を測定し、評価を行う。

集合 OFB, DFB, B, C (3.1 節参照) の要素数を各々 s, t, k, n とする。表1は、 (s, t, k, n) に対応する無矛盾な状態に、BB のラベル変更が必ず必要となる式を加えたとき、KB を更新するのに要する時間 (Lisp

表1 アルゴリズム実行時間
Table 1 Processing time of algorithm.

状態	s	t	k	n	k'	時間	時間比
1	2	1	2	3	1	17	1
2	3	2	4	5	2	31	1.8
3	3	3	6	6	3	50	2.9
4	4	4	8	7	4	133	7.8
5	4	5	10	8	5	205	12
6	5	6	12	10	6	383	22
7	5	7	14	11	7	1100	64
8	6	8	16	13	8	2850	170

コンパイラ使用時で、単位は msec) を測定した結果である。同表で k' は BB で valid 以外のラベルをもつ要素の数である。また、状態 1 の実行時間を基準としたときの実行時間比も付記する。

実行時間比が $2^{k'-1}$ で近似できることから、アルゴリズムの実行時間が、ラベル変更を要する式の数 k' の増加にともない、指数オーダとなることを示している。したがって、BMS を実用的なシステムにするには、効率面での改善が不可欠であろう。

8. む す び

本論文では、完全な知識、および不完全な知識を受理し、非単調な推論を進める知識処理システム BMS の枠組を中心に述べた。BMS は、知識ベースの無矛盾性を維持する機能を有しており、刻々変化する信念を動的に管理することができる。さらに信念の状態を直接参照できるため、外部に対して柔軟な応答が可能となる。また本論では、非単調推論における多重拡張世界問題に対して、優先順位導入による一解決法を BMS を通して議論した。

先に触れたとおり、現段階の BMS は、いわゆる重いシステムであり、メモリ面、速度面で種々の課題を内包している。現在データベースシステムへの適用を試みており、変数を含む体系への拡張、証明論的システムへの移行を含め、実システムとして考察していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 松本, 佐藤: 非単調論理と常識推論, 情報処理, Vol. 30, No. 6, pp. 674-683 (1989).
- 2) Moore, R.C.: Semantical Considerations on Nonmonotonic Logic, *Artif. Intell.*, Vol. 25, No. 1, pp. 75-94 (1985).
- 3) Moore, R.C.: Possible-World Semantics for Autoepistemic Logic, *AAAI Non-Monotonic Reasoning Workshop*, pp. 344-354 (1984).
- 4) 馬場口, 森馬, 手塚: 命題自己認識論理における拡張世界構成アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 7, pp. 979-987 (1990).
- 5) 森馬, 馬場口, 手塚: 信念に基づく非単調知識処理システム BMS, 第 39 回情報処理学会全国大会論文集, 5C-4 (1989).
- 6) 森馬, 馬場口, 手塚: 非単調知識処理システム BMS とその応用, 情報処理学会知識工学と人工知能研究会資料, 68-1 (1990).

7) 森馬, 馬場口, 手塚: 非単調知識処理システム BMS の論理的考察, 第 40 回情報処理学会全国大会論文集, 5C-8 (1990).

8) Brewka, G.: Preferred Subtheories: An Extended Logical Framework for Default Reasoning, *Proc. IJCAI '89*, pp. 1043-1048 (1989).

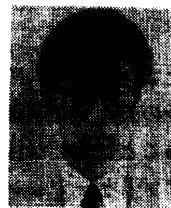
9) Doyle, J.: A Truth Maintenance System, *Artif. Intell.*, Vol. 12, No. 3, pp. 231-272 (1979).

10) de Kleer, J.: An Assumption-based TMS, *Artif. Intell.*, Vol. 28, No. 2, pp. 127-162 (1986).

11) Poole, D.: A Logical Framework for Default Reasoning, *Artif. Intell.*, Vol. 36, No. 1, pp. 27-47 (1988).

(平成 2 年 3 月 27 日受付)

(平成 2 年 10 月 9 日採録)



森馬 純一 (正会員)

昭和 40 年生。昭和 63 年大阪大学工学部通信工学科卒業。平成 2 年同大学院前期課程修了。現在宇宙開発事業団勤務。在学中、非単調推論に関する研究に従事。



馬場口 登 (正会員)

昭和 32 年生。昭和 54 年大阪大学工学部通信工学科卒業。昭和 56 年同大学院前期課程修了。昭和 57 年愛媛大学助手、昭和 62 年大阪大学助手、平成 2 年同学工学部講師、現在に至る。工学博士。人工知能、パターン認識、画像処理の研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、人工知能学会各会員。



手塚 慶一 (正会員)

昭和 3 年生。昭和 26 年大阪大学工学部通信工学科卒業。同大学院特別研究生、愛媛大学、山口大学、大阪大学助教授を経て、現在大阪大学工学部教授。データ通信、通信ネットワーク、オートマトン、パターン処理、データベース、知識処理などの研究に従事。工学博士。著書「電子計算機基礎論」、「電子計算機システム論」、「ディジタル画像処理工学」など。IEEE、電子情報通信学会、電気学会、人工知能学会各会員。