論 文

視野に基づいた知識表現とその意味

正 員 犬塚 信博[†] 正 員 石井 直宏[†]

Knowledge Representation Based on Scope, and Its Semantics

Nobuhiro INUZUKA[†] *and* Naohiro ISHII[†], *Members*

あらまし 知識表現の新たな枠組みを提案し，そこで表現される概念の意味を定式化する．また，我々の枠組みに基づいた推論の機構についても検討し，概念の意味と推論の効率との関連について考察する．従来，人工知能で用いられてきた知識表現の意味論は，モデル理論に基礎をおくものである．しかし，この意味論では概念の意味は外延的にとらえられるのみであり，概念の定義のされ方による意味の違いを表現できない．本研究では概念の意味を構成するものを，他の概念との関係，および，その概念を使用する際の使用者の癖からなると考え，これらを表現する枠組みを概念システムとして定式化する．そこでは，知識を表現するすべての理論を考慮した結果得られるモデルにより概念に意味を与えるモデル論的意味論とは異なり，注目する概念の集合，つまり，視野内の概念を定義する理論のみを考慮することによって，他の概念との関係をとらえる．また，視野となり得る概念の集合に制限を設けることにより，概念使用者の癖を表現する．こうした癖を導入することにより，概念の定義の仕方の違いによる理解のしやすさの違いを論ずることが可能となる．

キーワード 知識表現，推論，意味論，モデル理論

1. まえがき

人工知能システムでは多くの知識が表現され，利用される．また，そのための知識表現の枠組みには，フレームシステム，意味ネットワーク，一階述語論理を基礎としたシステムなど多くのものがある．このように知識を表現し用いることの重要性は疑いの余地がない．しかし，そこで表現された知識の意味は，十分満足されるものとして定義されているとは考えられない．知識の意味を十分にとらえることは，推論過程における知識の働き，および学習される内容としての知識を明確にするためにも重要である．また，これによって知識の働きのより包括的な研究が可能となり，現実の人工知能システムへの応用もより進むことが期待される．

そこで，本論文では知識表現されるべき知識の意味について再検討を行う．すなわち，本論文の目的は，従来知識表現によって表現されてきた概念の意味，あるいは我々人がとらえている概念の意味について再検討を加え，概念を表現するために必要な枠組みを新たに提示し，そこで表現された概念の意味を定式化することである．また，この定式化により，知識の働きがより明確となり，知識の利用，学習などの基礎として有用であることを述べる．

但し，本論文では，1階述語論理において述語として扱われるもの，すなわち概念（および多引数の概念である関係）のみを表現される知識として取り扱う．知識表現された概念の意味は，1階述語論理の意味論であるモデル理論(model theory)[(1),(2)]を基礎にするのが一般的である．そこでは，知識は，一階述語論理(あるいは他の論理)の論理式，または論理式に対応づけられた何らかの表現によって与えられ，これらの論理式を矛盾なく解釈するモデルによって論理式に現れる各述語の意味が割り当てられる[(3),(4)]．モデル論的には，このようにして与えられる概念の意味は外延(extension)，つまり，その概念が示す性質をもつ対象の集合である．本論文では，モデル論的意味論では概念の意味を十分にとらえられないことを示し，それに代わるものを提案する．このとき本論文では，**2.** で検討するように，人は概念の意味を他の概念との関係としてとらえていると考え，これを仮定する．また，我々が提案する概念システムに基づいた推論の枠組みを示し，その上で推論の効率と概念の意味との関連についても検討する．

† 名古屋工業大学工学部電気情報工学科，名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

2. 概念の意味と概念システム

本論文では概念の意味は二つの要素からなると考える．一つは他の概念との関係であり，もう一つはそうした概念を用いる者（解釈者）の概念の使用時における癖である．本章では，これら二つの要素が，概念の意味を適切にとらえるためには必要であることを示す．ここで，知識表現は1階述語論理の論理式によってなされるとし，この知識を表現する論理式の集合（すなわち，理論）をΔで表す．また，Δに現われるすべての概念名の集合を$\mathscr{C}$とする．$\mathscr{C}$の要素は概念の名前であり，その実体がどのような属性をもつべきかを検討することが本論文の課題である．

本論文では理論Δに現れる概念名の集合$\mathscr{C}$の部分集合を視野と呼ぶ．また，視野sに含まれる概念名のみが現れる論理式の集合を$\Delta(s)$と表記する．

2.1 関係としての概念の意味

我々はある概念の意味を明示的あるいは意識的にとらえる場合，他の概念の間の関係としてとらえる．このことは，「〜とはどういう意味か」という問に対し，他の概念を表す言葉の組合せによって答えるほかに手段がないこと，そして，通常このように答えることは適切に思われることからもわかる．また，これまでAIシステムに用いられてきた知識表現の多くは，1階述語論理の論理式，意味ネットワークのリンク，フレームシステムのフレームなど，いずれも他の概念との関係を記述するものであった．このように概念を関係としてとらえる考え方が有力である[5]．

例えば，次の理論Δは1階述語論理によって知識を表現するものである．

$$\begin{aligned}\Delta=\{&\forall x\forall y(\mathrm{On}(x,y)\supset\mathrm{Above}(x,y)),\\ &\forall x\forall y\forall z(\mathrm{Above}(x,y)\wedge\mathrm{Above}(y,z)\supset\\ &\mathrm{Above}(x,z)),\\ &\forall x\neg\mathrm{On}(x,y)\supset\subset\mathrm{Clear}(y),\\ &\forall x\neg\mathrm{On}(y,x)\supset\subset\mathrm{Table}(y),\\ &\mathrm{On}(A,B),\mathrm{On}(D,E),\mathrm{Above}(B,C)\}\end{aligned}\qquad(1)$$

このうち，1番目の論理式は述語Onと述語Aboveの関係を記述したものであり，2番目の論理式や最後の三つの式は各々それ自身の内部での関係を記述したものである．しかし，本論文では他の概念との間の関係のみを扱う．これは後述する視野が論理式の集合ではなく，概念の集合によって決められるためである．

更に，概念の意味をとらえることはその概念の理解につながるが，この概念の理解には概念の仮想的操作可能性が重要である[6]．つまり，あるものを手でもって操作してみることがその理解に大切であることと同様に，概念の意味を規定する知識によって概念の意味を理解するには，他の概念内容を仮想的に操作し，目的の概念に反映される意味の変化を確かめることが重要であると思われる．この操作は概念間の関係を確かめるものである．つまり，ある概念cを仮想的に操作するとは，次の操作を繰り返すことで概念cと他の概念との間の関係を発見的にとらえることである．すなわち，①概念cを規定する知識（理論）のモデルを一つ作り，②そのモデルにおけるcの外延および他の概念の外延を観察することでそれらの間に規則性（関係）を発見，あるいは確認することの繰返しである．概念の外延を，知識に無矛盾なままに変化させ，概念間の関係を観測することが仮想的な操作であると言い換えることもできる．これを効果的に行うには，概念の外延を無矛盾なままに動かし得る十分広いモデルの領域が必要である．そこで，この動かし得るモデルの大きさをその概念の理解のしやすさを表す係数として，次の定義1により導入する．なお，本論文で扱う関係は，外延によって記述され得るものである．つまり，外延上の関係$\tilde{R}(\subseteq 2^U\times 2^U)$が存在し，$\gamma_1R\gamma_2\leftrightarrow\{x\in U|\gamma_1(x)\}\tilde{R}\{x\in U|\gamma_1(x)\}$を満たすような概念間の関係$R$に限定する．ここで，$U$は対象の全体集合である．こうした関係を外延的な関係と呼び，以後関係と言えば外延的なものに限定する．また，概念と概念名を同一視し，$\gamma_1R\gamma_2$をγ_1,γ_2を表す概念名c_1,c_2を用いてc_1Rc_2と書く．今後概念間の関係Rに対応する外延上の関係を$\tilde{R}$と表記することにする．

［定義1］ Δを理論，c_1,c_2をある概念名，Rをc_1,c_2で表される概念上で考えたいある関係とする．また，sをc_1,c_2を含む概念名のある集合とする．このとき，Δにおけるsに対するc_1とc_2の間の関係Rの操作的理解可能性係数$\boldsymbol{u}(c_1,c_2,R,s,\Delta)$を次のように定める．

$$\boldsymbol{u}(c_1,c_2,R,s,\Delta)=\begin{cases}|\{\langle\{x|\models_I c_1(x)\},\{x|\models_I c_2(x)\}\rangle\\ \quad|I\text{ は }\Delta(s)\text{ のモデル}\}|\\ \quad;\{x|\models_I c_1(x)\}\tilde{R}\{x|\models_I c_2(x)\}\\ \quad\text{なる }I\text{ がない場合.}\\ \top\text{ ; その他の場合.}\end{cases}\qquad(2)$$

但し，$|A|$は集合Aの濃度を表す． □

$\top$をとるのは，c_1,c_2が関係Rを満たさない$\Delta(s)$のモデルが存在する場合である．ここで，$\top$を含めた

順序関係を「$\boldsymbol{u}$ の任意の値 a に対して $a \leqq \top$」と定めておく．操作的理解可能性係数 $\boldsymbol{u}$ は，視野内の理論のどのモデルでも関係 R が成り立ち，この関係を成り立たせる十分多用な外延を各概念がとり得るとき大きな値をとる．関係 R を満たさない外延をとるモデルがあるときはこの関係は理解され得ないと考え，特別な値 $\top$ をとるとする．従って，$\boldsymbol{u}$ の値が大きいほど，R は操作によって確認されやすいと考えられる．また，$\boldsymbol{u}$ が 0 あるいは $\top$ の場合は明らかに関係 R は確認されない．$\boldsymbol{u}=1$ の場合も，関係 R は排除はされないが，操作による確認はできない．すなわち，無矛盾なモデルをいくつか作り各モデルにて関係が満たされることを確認することができない．このため，その関係が本質的なものであるかどうかわからず，関係を理解できるとは言えない．

もし知識を表現する理論 Δ が完全な理論であるならば，Δ のモデルは一意に決定される．すなわち，Δ のモデルとは次を満たす解釈 I である．

$\models_I p$ for all $p \in \Delta$

このときこのモデル I における概念 c の外延，すなわち $\{x | \models_I c(x)\}$ が概念 c のモデル理論的な意味である．しかし，このような完全な理論によっては概念間の関係をとらえることはできない．操作的理解可能性係数によってこのことは次のように述べられる．

［命題1］ Δ が完全な理論，$\mathscr{C}$ が Δ に現れるすべての概念名の集合のとき，任意の概念名 c_1, c_2 および，任意の関係 R に対して，次が成り立つ．

$$\boldsymbol{u}(c_1, c_2, R, \mathscr{C}, \Delta)=1 \quad \text{or} \quad \top \qquad (3)\square$$

2.2 部分的外延

前節で見たように完全な理論を一度に考慮した場合は，概念間の関係を扱うことはできない．また，完全ではなくとも，与えられた理論 Δ の全体を考慮した場合には適切に概念間の関係をとらえられるとは言えない．しかし，次の性質が示すように，理論の一部，つまり $\Delta(s)$ を考慮することによってより適切に概念間の関係をとらえることができる．

［性質1］ 視野 s, s' が $s \subseteqq s'$, $c_1, c_2 \in s$ のとき，次が成り立つ．

$$u(c_1, c_2, R, s, \Delta) \geqq u(c_1, c_2, R, s', \Delta) \qquad (4)\square$$

$s \subseteqq s'$ ならば $\Delta(s) \subseteqq \Delta(s')$ であること，および一階述語論理の単調性より上の［性質1］が成り立つことは明らかである．このように理論の一部のみを考慮することで関係をより適切にとらえられるが，これをはっきりと記述するために次の関数を導入する．

$$\mathbf{ext}_c^{\Delta,s} : \{I | I \text{ は } \Delta(s) \text{ のモデル}\} \to 2^U$$
$$I \mapsto \{x | \models_I c(x)\} \qquad (5)$$

この関数を（Δ における）s に対する c の部分的外延(partial extension) と呼ぶ．これは複数存在する各モデルからそのモデルにおける c の外延への関数である．

概念 c の部分的外延は，その定義域であるモデルを操作することで概念 c がどのような外延をとるかを示す関数である．s を固定した場合，s に含まれる他の概念 c' も同様に部分的外延をもつが c と c' の間の関係は s のモデルの集合を介してとらえられることになる．上の性質1が示すように部分的理論によって操作的理解可能性係数が上がる．そして，このとき操作によってとらえられる関係は，次の性質が示すとおり，実際に概念間にその関係が成り立っている．

［性質2］ $\boldsymbol{u}(c_1, c_2, R, s, \Delta) \neq \top$ ならば，$\Delta(s)$ の任意のモデル I に対して，$\mathbf{ext}_{c_1}^{\Delta,s}(I) \tilde{R}\, \mathbf{ext}_{c_1}^{\Delta,s}(I)$ が成り立つ．　□

この性質が成り立つことは操作的理解可能性係数の定義から明らかである．

例えば，式(1)に挙げた理論において視野 $s=$ {Above, On} としたとき，$\Delta(s)$ には式(1)の第1，2，5，6，7番目の式のみが含まれる．これによって Above と On の間の関係が部分的外延によって調べられる．Above のこの s に関する部分的外延は第1，2，5，6，7番目の式からなる $\Delta(s)$ の各モデルから，そこでの Above の外延への関数であり，On の部分的外延も同様に各モデルからそこでの On の外延への関数である．各モデルにおいて，Above, On の外延がどのような外延をとるかを見ることでこれらの間の関係をとらえていると考える．

このように，部分的外延はモデルを介した概念間の関係の記述と見ることができる．また，モデルを仮想的に操作することができることから，人の概念の意味のとらえ方として適切なモデルであると考える．

上述のとおり，部分的外延は，視野を一つに固定した場合の可能なモデルから各概念の外延への関数であったが，我々人は状況に応じて考慮に入れる知識を変える．例えば，幾何学の問題を考えている場合には図形等の知識を考慮し，問題が少し複雑とわかると解析幾何の知識も考慮に入れるかもしれない．また，旅行の段取りを考える場合には，別の知識を考慮に入れるであろう．つまり，視野はさまざまに変化し得る．そして，現在の視野に応じてそこに含まれる他の概念と

の関係をとらえる．このように関係としての概念の意味とは,「さまざまに変化し得る各視野に応じてそれぞれとらえられる他の概念との関係の総体」であると考えられる．これを次の関数によって形式化する．

$$\mathbf{mean}_c^{\Delta}: 2^{\mathscr{C}} \to \left\{ \begin{array}{l} \Delta \text{における} s \text{に対} \\ \text{する} c \text{の部分的外延} \end{array} \middle| s \subseteq \mathscr{C} \right\}$$

$$s \mapsto \mathbf{ext}_c^{\Delta,s} \qquad (6)$$

この関数を概念 c の Δ における意味 (meaning) と呼ぶ．

二つの概念が等しいのは上の関数が全く等しい場合である．但し，概念を使用する各場合においては視野は固定されており，その固定された視野において概念の働きが等しい場合には，ある意味でそれらの概念は等しいと言える．

［定義２］ Δ を理論，$\mathscr{C}$ を Δ に現れる概念名の集合，$c_1, c_2 \in \mathscr{C}$ をある概念名とする．また，$s_1, s_2 \subseteq \mathscr{C}$ とする．このとき，Δ において s_1 に対する c_1 と s_2 に対する c_2 が同じ意味をもつとは，次が成り立つ場合に言う．

$$\mathbf{ext}_{c_1}^{\Delta,s_1} \equiv \mathbf{ext}_{c_2}^{\Delta,s_2} \qquad (7)\square$$

また，ある場合に異なると思われる概念も，つまり，ある視野において部分的外延によってとらえられる他の概念との関係が異なる概念でも，十分考慮してみれば同じであることを次のように表す．

［定義３］ Δ を理論，$\mathscr{C}$ を Δ に現われる概念名の集合，$c_1, c_2 \in \mathscr{C}$ をある概念名とする．このとき，Δ において c_1 と c_2 が結局等しいとは，ある視野 s_1, s_2 が存在して s_1 に対する c_1 と s_2 に対する c_2 が同じ意味をもつ場合に言う．□

結局等しい概念とは，従来の言葉で言えば，外延的に等しい概念である．

2.3 meaningfulness と思考傾向

概念の意味を前節の関数 $\mathbf{mean}_c^{\Delta}$ によって定義することで，他の概念との関係付けが異なる概念はそれぞれ異なる意味をもつものとなった．しかし，これらは個々別々に全く無関係なものであるわけではない．定義２，３はその一面を表す．

ここでは，更に外延的に等しい概念の間にも我々にとっての理解のしやすさ，すなわちその概念を利用しようとした場合の有用さに違いがあることに注目し，この性質によって概念を定義する論理式の間に順序関係を導入する．この性質を meaningfulness と呼ぶ．

［定義４］ Δ を理論，$\mathscr{C}$ を Δ に現れる概念名の集合，$\mathbf{def}_1, \mathbf{def}_2$ をそれぞれ $\mathscr{C}$ に含まれない概念 c の定義式とする．このとき，概念 c に関して $\mathbf{def}_1$ は $\mathbf{def}_2$ よりも meaningful であるとは，次の二つが成り立つことである．但し，ここで c の定義式とは c が現れる論理式のことである．

（１） $\Delta \cup \{\mathbf{def}_1, \mathbf{def}_2\{c'/c\}\}$ を $\tilde{\Delta}$ とすると，$\tilde{\Delta}$ においで c と c' は結局等しい．

（２） $\Delta \cup \{\mathbf{def}_1\}$ を Δ_1, $\Delta \cup \{\mathbf{def}_2\}$ を Δ_2, そして $\mathscr{C} \cup \{c\}$ を $\tilde{\mathscr{C}}$ とする．このとき，$s \subseteq \tilde{\mathscr{C}}$ かつ $c \in s$ なる任意の視野 s において，

$$\mathbf{mean}_c^{\Delta_1}(s) \leqq \mathbf{mean}_c^{\Delta_2}(s) \qquad (8)$$

すなわち，

$$\mathbf{ext}_c^{\Delta_1,s} \leqq \mathbf{ext}_c^{\Delta_2,s}$$

が成り立つ．□

上の定義において「≦」は関数の近似関係を表す．すなわち，$\mathbf{ext}_1 \leqq \mathbf{ext}_2$ とは，任意の I において，$\mathbf{ext}_1(I) \neq$ 未定義 $\Rightarrow \mathbf{ext}_1(I) = \mathbf{ext}_2(I)$ を意味する．

ある視野において部分的外延の定義域がより狭い概念定義は，その概念の外延をその視野に含まれる他の概念との関係においてよりはっきりと（つまり，考え得るモデルがより少ないという意味で限定）させる．定義４は，こうしたことがすべての視野において成り立つ場合に，その概念定義はより meaningful であると呼ぶことを示している．

この定義により最終的に同じ外延をもつ概念定義の間の善し悪しを論ずることが可能となるが，実際にはすべての視野において式(８)が成り立つことはない．これは，視野のとり方によっては，異なった二つの定義どちらがより制限されたモデルの集合をとり得るかは常に変化するためである．しかし，このことは次のような観察に合わない．つまり，我々は言葉の定義の仕方によって，その理解の程度が異なるということである．例えば，平行四辺形を「向かい合う２組の辺がそれぞれ平行な四角形」と定義した場合と，「２本の対角線がお互いに中点で交差する四角形」と定義した場合では，そのわかりやすさが異なるであろう．（いずれがよりわかりやすいかは問題ではない．）

このことを meaningfulness に反映させるため，とり得る視野に制限を設ける．つまり，我々は知識のどのような部分集合でも，状況に応じて考慮の対象，つまり視野とすることができるわけではないとするのである．

すなわち，定義の理解のしやすさに差異があることを考えるならば，我々は知識の使い方に何らかの傾向，偏向，あるいは癖があると考えるべきである．ある概念を考慮する場合に同時に考慮に入れる概念の集合，

すなわち，視野がこの癖を決定する．このことを定式化するために，とり得る視野の集合を規定するものとして概念の全体集合$\mathcal{C}$の部分集合族，つまり，視野の族$\mathcal{H}$を新たに導入する．$\mathcal{H}$の元のみが視野となり得る．本論文ではこの$\mathcal{H}$を思考傾向（consideration habit）と呼ぶ．ここでは，$\mathcal{H} \subseteqq 2^{\mathcal{C}}$なる$\mathcal{H}$を$\mathcal{C}$上の思考傾向と呼ぶ．

従って，知識表現は概念を規定する論理式だけではなく，これらを解釈するシステムの思考傾向を合わせなければその働きを規定することはできない．そこで，我々は知識表現によって与えられ利用される知識の体系を，次の概念システム（system of concepts）としてとらえることを提案する．

［定義 5］　三つ組$\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$を概念システムと呼ぶ．但し，$\mathcal{C}$は概念名の集合，$\Delta$は$\mathcal{C}$に属す概念名のみが出現する論理式の集合，つまり，$\Delta(\mathcal{C})=\Delta$となる理論，そして，$\mathcal{H}$は$\mathcal{C}$上の思考傾向である．□

ある概念$c \in \mathcal{C}$に対し，$c \in s, s \in \mathcal{H}$なる$s$を$c$の$\mathcal{H}$-考慮域（$\mathcal{H}$-consideration scope）．また，$\{s | s$はcの$\mathcal{H}$-考慮域$\}$をcの$\mathcal{H}$-考慮域系（$\mathcal{H}$-consideration scopes' system）と呼び，$\mathcal{H}\text{-}\mathcal{S}(c)$と書く．$c$の$\mathcal{H}$-考慮域とは，思考傾向を$\mathcal{H}$とするシステムで概念$c$を用いている場合に同時に考慮する（ことができ，そして考慮しなければならない）概念の集合である．

概念システムΓの導入により概念$c \in \mathcal{C}$の意味である$\mathbf{mean}_c^{\Delta}$も$\mathbf{mean}_c^{\Gamma}$として次のように定義し直される．

$$\mathbf{mean}_c^{\Gamma} : \mathcal{H}\text{-}\mathcal{S}(c) \to \left\{ \begin{array}{l} \Delta \text{における } s \text{ に対す} \\ \text{る } c \text{ の部分的外延} \end{array} \middle| \; s \in \mathcal{H}-S(c) \right\}$$

$$s \mapsto \mathbf{ext}_c^{\Delta, s} \qquad (9)$$

新たにこの関数を概念cのΓにおける意味（meaning）と呼ぶことにする．これに応じて各定義を改める．

［定義 6］　概念システム$\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$において，$c_1, c_2 \in \mathcal{C}$をある概念（述語）とする．このとき，$\Gamma$において$c_1$と$c_2$が結局等しいとは，ある視野$s_1 \in \mathcal{H}\text{-}\mathcal{S}(c_1), s_2 \in \mathcal{H}\text{-}\mathcal{S}(c_2)$が存在して$s_1$に対する$c_1$と$s_2$に対する$c_2$が同じ意味をもつ場合に言う．□

［定義 7］　概念システム$\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$において，$\mathbf{def}_1, \mathbf{def}_2$をそれぞれ$\mathcal{C}$に含まれない概念$c$の定義式とする．このとき，概念$c$に関して$\mathbf{def}_1$は$\mathbf{def}_2$よりも meaningful であるとは，次の二つが成り立つことである．

（1）　$\Delta \cup \{\mathbf{def}_1, \mathbf{def}_2\{c'/c\}\}$を$\tilde{\Delta}$とすると，$\tilde{\Delta}$において$c$と$c'$は結局等しい．

（2）　$\Gamma_1=(\mathcal{C} \cup \{c\}, \Delta \cup \{\mathbf{def}_1\}, \mathcal{H}')$, $\Gamma_2=(\mathcal{C} \cup \{c\}, \Delta \cup \{\mathbf{def}_2\}, \mathcal{H}')$とする．このとき，$s \in \mathcal{H}'\text{-}\mathcal{S}(c)$なる任意の視野$s$において，

$$\mathbf{mean}_c^{\Gamma_1}(s) \leqq \mathbf{mean}_c^{\Gamma_2}(s) \qquad (10)$$

が成り立つ．但し，$\mathcal{H}'$は何らかの方法で決定された$\mathcal{C} \cup \{c\}$上のある思考傾向である．□

いずれの場合も，視野となり得る概念の集合が限定されている．これによって，適切な場合に式（7）が満足されることになる．ここで，思考傾向$\mathcal{H}'$は新たに導入された概念を含めた上で定められたものである．人の場合には，これは新たな概念を導入した文脈，あるいはこの概念名のつづりがもつ歴史的な意味などによって決まると考えられる．計算機による実現でも前者は考慮する必要がある．

次の定理が示すように，この meaningfulness は理解できるかどうかでのみ操作的理解可能性をとらえるものである．

［定理 1］　概念システム$\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$において，定義式$\mathbf{def}_1$が，定義式$\mathbf{def}_2$より$c$に関して meaningful であるとき，次が成り立つ視野s，関係R，概念名$\hat{c}$は存在しない．

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}(c, \hat{c}, R, s, \Delta \cup \{\mathbf{def}_1\}) \neq \top \\ \boldsymbol{u}(c, \hat{c}, R, s, \Delta \cup \{\mathbf{def}_2\}) = \top \end{cases} \qquad (11)$$

（証明）

（Ⅰ）　$\boldsymbol{u}(c, \hat{c}, R, s, \Delta \cup \{\mathbf{def}_1\}) \neq \top$のとき

式(11)を満たす$s, R, \hat{c}$があったとする．すると，あるIでは，

$$\mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I) \tilde{R}\, \mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I)$$
$$\mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_2\}, s}(I) \tilde{\not R}\, \mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_2\}, s}(I) \qquad (12)$$

となる．このときのIをI_0とすると．ところが，$\mathbf{def}_1$は$\mathbf{def}_2$以上に meaningful であり，$\mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I_0)$は値をもつので，次が成り立つ．

$$\mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I_0) = \mathbf{ext}_c^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I_0) \qquad (13)$$

更に，補題 1 からわかるように$\mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I_0)$および$\mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_2\}, s}(I_0)$はいずれも値をもっており，またこれらの関数は単にモデルからある概念の外延を射影するのみなので次の式も成り立つ．

$$\mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_1\}, s}(I_0) = \mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta \cup \{\mathrm{def}_2\}, s}(I_0) \qquad (14)$$

しかし，式(13)，式(14)は式(12)で示される関係に矛盾しており，故に式(11)を満たす$s, R, \hat{c}$は存在しない．

(II)　$\boldsymbol{u}(c, \hat{c}, R, s, \Delta\cup\{\mathbf{def}_1\}) \neq \top$ のとき

式(11)を満たす $s, R, \hat{c}$ があったとする．すると，ある I では，

$$\mathbf{ext}_c^{\Delta\cup\{\mathrm{def}_2\},s}(I)\,\bar{R}\,\mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta\cup\{\mathrm{def}_2\},s}(I) \tag{15}$$

となる．このときの I を I_0 とする．$\mathbf{ext}_c^{\Delta\cup\{\mathrm{def}_2\},s}(I_0)$ は値をもつことを式(15)は示しており，それ故 $\mathbf{ext}_c^{\Delta\cup\{\mathrm{def}_1\},s}(I_0)$ も同じ値をもつ．更に，補題1から $\mathbf{ext}_{\hat{c}}^{\Delta\cup\{\mathrm{def}_1\},s}(I_0)$ も同じ値をもつが，このことは式(11)に矛盾する．

□

［補題1］　$\Gamma=(\mathscr{C}, \Delta, \mathscr{H})$ を概念システム，$c, c'\in\mathscr{C}$ をある概念，そして $s\in\mathscr{H}-\mathscr{S}(\{c, c'\})$ とする．このとき，任意の解釈 I に対して $\mathbf{ext}_c^{\Delta,s}(I_0)$ が値をもてば $\mathbf{ext}_{c'}^{\Delta,s}(I_0)$ も値をもつ．　□

3.　概念システム上の推論

前章では，概念の意味を定義するためには概念を規定する論理式だけではなく，これを使用するシステムの癖も加味しなければならないことについて述べ，これらを考慮した知識表現の枠組みを概念システムとして定式化した．この定式化において，視野は重要な働きを担っている．本章では，視野が現在考慮に入れている概念の集合を表していることを念頭において，本論文で定式化した概念システムの上での推論機構の枠組みについて論ずる．また，具体例により概念定義の meaningfulness と推論の効率について検討する．

3.1　推論機構

従来のプロダクションシステムと同様に，知識を蓄えた知識ベース，現在の中間結果を保持したコンテキスト，そして，知識ベース内の知識とコンテキストに保持された中間結果をもとに推論する推論部の三つの部分から構成された推論システムを考える．概念システムを基礎とした場合，現在の視野も考慮しなければならない．視野は時刻と共に変化するものであるので，中間結果と共にコンテキストに保持することにする．また，推論機構について考えるために，以下の二つを原理として認めることにする．

（1）　現在抱えている問題についての記憶はすべてコンテキストに記憶されている．（コンテキストの原理）

（2）　現在の視野は現在の中間結果に現れる概念をすべて保持しなければならない．（視野の原理）

前者は従来のプロダクションシステムが従ってきた当然のものを確認したにすぎない．前述のとおりコンテキストとして中間結果と視野をもつが，通常のプロダクションシステムがコンテキストとしてもっている情報はすべて中間結果として保持されている．後者の原理は，考慮し得る概念は視野内の概念だけであるという視野に期待される性質から必然的に導かれるものである．これらの原理に従って次のように推論を規定する．

推論とは，次に示す二つの系列の対である．つまり，論理式または記号 ε の系列

$$P=p_1, p_2, \cdots, p_n, \cdots \tag{16}$$

と，視野と中間結果の二つから構成されるコンテキストの系列

$$X=(s_1, r_1), (s_2, r_2), \cdots, (s_n, r_n), \cdots \tag{17}$$

の対 (P, X) である．但し，次の3条件を満たす．

（1）　$r_i=\begin{cases}\{p\in r_{i-1}|p\lhd s_i\}\cup\{p_i\}, & p_i\neq\varepsilon \text{ のとき}\\ \{p\in r_{i-1}|p\lhd s_i\}, & p_i=\varepsilon \text{ のとき}\end{cases}$

（2）　p_i ならば，$p_i\in\Delta(s_i)$，または，p_i は $p_{i1}, \cdots, p_{in}\in(r_1-\{p_i\})$ および $q_1, \cdots, q_m\in\Delta(s_i)$ から推論規則によって得られる．

（3）　$s_{i-1}\triangle s\subset s_{i-1}\triangle s_i$ を満たす視野 $s\in\mathscr{H}$ は存在しない（但し，$A\triangle B$ は A と B の symmetric difference を示す）．

ここで，$p\lhd s$ は論理式 p は視野 s 内の述語のみからなることを示す．

上の（1），（2）は前述の二つの原理，および推論の妥当性を考慮することにより自然に定まる．また，（3）は視野の動きは最小限の刻みで行われるべきことを示しており，後に述べるように視野の広さは狭い方が効率面より都合が良いことから導入したものである．

上の3条件は最低限推論が満たすべきものであり，これらだけでは推論システムを構築するには不十分である．具体的なシステムを考えるには，これらを満足しつつ視野移動の戦略を定めなければならない．中間結果を含んだコンテキストの系列は，視野移動の戦略を定めることで自動的に決定される．

3.2　推論効率に関する検討

例えば次のシステム Γ_1, Γ_2 を考える（図1参照）．

$\Gamma_1=(\mathscr{C}, \Delta_1, \mathscr{H}), \Gamma_2=(\mathscr{C}, \Delta_2, \mathscr{H})$，

但し，

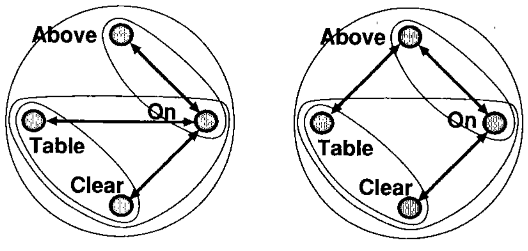
$\mathscr{C}=\{\mathrm{On, Table, Clear, Above}\}$，

$\Delta=\{\forall x\forall y(\mathrm{On}(x, y)\supset\mathrm{Above}(x, y))$，

$\forall x\forall y\forall z$

$(\mathrm{Above}(x, y)\wedge\mathrm{Above}(x, z)\supset\mathrm{Above}(x, z))$，

$\forall x\neg\mathrm{On}(x, y)\supset\subset\mathrm{Clear}(y)$，



System Γ_1　　System Γ_2

図 1　概念システムの例
Fig. 1　Examples of systems of concepts.

$$\mathrm{On}(A, B), \mathrm{On}(D, E), \mathrm{Above}(B, C)\},$$
$$\Delta_1=\Delta\cup\{\forall x\neg\mathrm{On}(y, x)\supset\subset\mathrm{Table}(y)\},$$
$$\Delta_2=\Delta\cup\{\forall x\neg\mathrm{Above}(y, x)\supset\subset\mathrm{Table}(y)\},$$
$$\mathcal{H}=\{\{\mathrm{Above, Table, Clear, On}\}, \{\mathrm{Table, Clear, On}\}, \{\mathrm{Table, Clear}\}, \{\mathrm{Above, On}\}\}.$$

すると，概念 Table は Γ_1 でなされている $\mathbf{def}_1$ による定義の方がより meaningful である．

このとき，例えばある対象 E について Table(E) の真偽を推論する場合，たとえ Γ_1 では，視野を {Table, Clear, On} まで広げ，On に関する事実に還元することで Table(E) の真偽がわかっても，Γ_2 では視野を {On, Table, Clear, Above} にまで広げなくてはならない．この視野の拡大は効率の低下を招く．視野の拡大は次の 2 点で効率を下げることになると考えられる．一つは，視野を拡大することそのものにコストがかかることであり，もう一つは視野を拡大したことで使用可能な知識が増加し，更に推論をする場合，一つひとつの知識の適用コストが増大することである．

この例が示すように，より meaningful な定義は概念をより狭い視野内の概念に結び付け，そのために推論効率に良い影響を与える．つまり，meaningfulness は意味論的な性質というだけではなく，推論の効率とも関連していることがわかる．

エージェントがもつ知識をより使いやすいものへ変換してゆく知識の洗練は，本枠組みにおいて meaningfulness の獲得として扱うことができると考える．これを用いた機械学習への応用は今後の課題である．

4. 概念システムの諸クラス

いくつかの概念システムについて述べることで，思考傾向の働きについて述べる．(1)のモデル論的概念システムで述べるように本枠組みは従来の枠組みを包含するものであり，(2)，(3)のような，人のモデルとしてより適当と思われるものも含む．また，(4)には，組込み述語を含む Prolog システムのような機械的システムを本枠組みで扱う試みとして示す．

(1) モデル論的概念システム

概念システム $\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$ で，$\mathcal{H}=\{\mathcal{C}\}$ とするとこの $\mathcal{H}$ も思考傾向である．このとき，$c\in\mathcal{C}$ の $\mathcal{H}$-考慮域は，$\mathcal{H}$-$\mathcal{S}(c)=\{\mathcal{C}\}$ である．従って，概念 c の意味 $\mathbf{mean}_c^\Gamma$ は，

$$\mathbf{mean}_c^\Gamma:\{\mathcal{C}\}\to\left\{\begin{array}{l} s\text{ における }c \\ \text{の部分的外延}\end{array}\middle| s\in\{\mathcal{C}\}\right\}$$

となる．

しかし，$\mathbf{mean}_c^\Gamma$ は定義域が一者集合なのでこれは $\mathbf{mean}_c^\Gamma(\mathcal{C})=\mathbf{ext}_c^{\Delta,\mathcal{C}}$ と同一視される．Δ が完全であれば，これはモデル論的な外延的意味である．このような概念システムをモデル論的概念システムと呼ぶ．

(2) トポロジカルな概念システム

概念システム $\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$ で，思考傾向 $\mathcal{H}$ を次のように定める．任意の概念 $c\in\mathcal{C}$ に対して $\{c\}$ は $\mathcal{H}$ に属す．$s\in\mathcal{H}$ のとき，s に含まれるある概念 c と別の概念 c' がともに現れる定義式が少なくとも一つ Δ に含まれるならば，$s\cup\{c'\}$ も思考傾向 $\mathcal{H}$ に属す．

無向グラフ $G^\Gamma=(V^\Gamma, E^\Gamma)$ を考えることで特徴付け可能である．頂点集合は $V^\Gamma=\mathcal{C}$，辺集合は $E^\Gamma=\{\{c_1, c_2\}| c_1$ と c_2 を含む定義式が Δ 内に少なくとも一つ存在する$\}$ である．上の思考傾向 $\mathcal{H}$ に含まれるものはグラフ G^Γ の連結部分グラフの頂点集合である．

この概念システムは何も癖をもたない素直なシステムである．しかし，視野の広がりを追うことで考慮している概念を追跡することができる．こうした概念システムをトポロジカルな概念システムと呼ぶ．

(3) 神経回路網的概念システム

概念システム $\Gamma=(\mathcal{C}, \Delta, \mathcal{H})$ で，前の例と同様にグラフ G^Γ を考える．但し，先程と異なり辺には正の実数の重みが付いている．このとき，思考傾向 $\mathcal{H}$ を次のように定める．任意の概念 $c\in\mathcal{C}$ に対して $\{c\}$ は $\mathcal{H}$ に含まれる．$s\in\mathcal{H}$ のとき，節集合 s から誘導される G^Γ の部分グラフ $G_s^\Gamma=(s, E_s^\Gamma)$ に対し，辺の集合 $T=\{\{c_1, c_2\}| c_1\in s, c_2\in V^\Gamma-s\}$ を考える．このとき，$\{c_1, c_2\}(c_1\in s, c_2\in V^\Gamma-s)$ が T に含まれる辺のうち最小の重みをもつ辺の一つであれば，$s\cup\{c_2\}$ も思考傾向である．重み付けによって思考の癖を表現することのできるシステムである．このような概念システムを神経回路網

的な概念システムと呼ぶ．重みの調整による適切な思考傾向の学習についての検討は今後の課題である．

（4） カーネルをもつ概念システム

概念システム $\Gamma=(\mathcal{C},\Delta,\mathcal{H})$ を考える．但し，思考傾向 H は次のとおりである．

$\forall s \in \mathcal{H},\quad \mathcal{K} \subseteq s$

このとき，$\mathcal{K}$をこのシステムのカーネルと呼ぶ．カーネルをもつ概念システムはEBL[7],[8]による効率の学習を説明するのに適している．つまり，$\mathcal{K}$の中にある概念のみからなる表現は操作可能性基準を満たすとする．そして，EBLによる学習とは概念 c の定義をカーネル$\mathcal{K}$の中の概念で書き直すことであるとする．このとき，概念 c の定義が操作可能性基準を満たすならば，この定義は最もmeaningfulな定義であり，EBLによる学習は概念の定義をmeaningfulにすることである．なぜなら，操作可能性基準を満たすため，この定義を構成する概念はすべて c の最も小さな$\mathcal{H}$-考慮域に含まれるからである．前述のようにmeaningfulな概念の定義と推論効率の関連をより検討することで，EBLの学習としての意味付けが可能であると考えられる．

5. むすび

概念の意味を新たに他の概念との関係，および概念を使用するものの癖からなるととらえ，これを概念システムとして定式化した．他の概念との関係は，部分的な知識である視野の導入によって部分的外延として，また，概念使用者の癖は視野の移動範囲の制限，つまり，思考傾向によって表した．これにより，外延的に等しい概念間の違いについて論ずる枠組みが与えられ，定義方法の違いによる理解のしやすさをmeaningfulnessとして与えることができた．また，meaningfulnessを用いた機械学習への応用の可能性についても触れた．

しばしば計算資源の有限性[9]が問題となるが，本論文で導入した視野は，こうした有限の範囲しか考慮できないこと（計算資源が有限であることと，有限の範囲しか考慮できないことは等価ではなく，この点については検討の余地がある）を明確に表現したものであり，この有限性によって概念の意味が現出することを示した．また，本枠組みによる概念の意味は，知識が不完全であっても適切に与えることができる．更に，任意の考慮域に含まれる知識が無矛盾であれば，たとえ全体の知識が矛盾するものであっても，概念には順当な意味を付与することができる．

このように，人にも当てはまると考えられる計算資源の有限性に基づいている点，本論文でも検討し，また多くで妥当と考えられている関係としての概念の意味を扱い得る点，そして記述によって意味が異なるという事実を説明し得る点で，本枠組みは人の概念のとらえ方のモデルとして適当であると考える．

文献

（1） Chang C. C. and Keisler H. J.: "Model Theory, 2nd ed.", North-Holland (1977).

（2） 長尾 真，淵 一博："情報科学講座7 論理と意味"，岩波書店(1983).

（3） Genesereth M. R. and Nilsson N. J.: "Logical Foundations of Artificial Intelligence", Morgan Kaufmann Publishers (1987).

（4） Nebel B.: "Reasoning and Revision in Hybrid Representation System, Lecture Note in Artificial Intelligence 422", Springer-Verlag (1990).

（5） 中島秀之："知識表現の基礎(1)—なぜ知識が表現できるのか"，人工知能学会誌，4, 4, pp. 383-388 (1989-07).

（6） Lindsay P. H. and Norman D. A.: "Human Information Processing An introduction to Psychology, 2nd Edition", Academic Press, New York (1977).

（7） Mitchell T. M., Keller R. M. and Kedar-Cabelli S. T.: "Explanation-based Generalization; An Unifying View", Machine Learning, 1, 1, pp. 47-80 (1986).

（8） Kodratoff Y.: "Introduction to Machine Learning", Morgan Kaufmann Publishers (1988).

（9） Hasida K. and Matsubara H.: "Partiality of Information and the Structure of Frame Problem", Proc. Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence '90 (PRICAI '90) (1990).

（平成3年5月20日受付，4年1月13日再受付）

犬塚　信博

昭62名工大・工・情報卒．平1同大大学院博士前期課程電気情報工学専攻了．平4同大大学院博士後期課程電気情報工学専攻了．現在，同大電気情報工学科助手．人工知能，特に帰納的学習，知識表現に関する研究に従事．工博．

石井　直宏

昭38東北大・工・電気卒．昭43同大大学院博士課程電気および通信工学専攻了．同年同大・医・助手．昭50名工大・工・助教授を経て，現在，同大電気情報工学科教授．この間，しきい値論理，医用情報処理，および非線形処理の研究に従事．工博．