RF-003

概念生成による創造的飛躍と創造的問題解決
Creative Leap and Creative Problem Solving by Concept Generation

金盛 克俊 † 太原 育夫 ‡
Katsutoshi Kanamori Ikuo Tahara

1 はじめに

人工知能研究において，既存の知識に含まれない新しい概念を生成する創造的な知識処理について充分な議論がなされてきたとはいえない．新しい概念の生成は，人間の創造活動にも深く関わっていると考えられる．本論文では，知識に含まれない新しい概念を教師なしに自発的に獲得する手法を定式化し，概念を生成することによって元の知識からは得られない飛躍的な帰結が得られること，また概念を生成することにより知識の対象領域を自然に拡張できることを示す．

新たに得られた事例や事実を説明する仮説を生成する推論として帰納推論やアブダクション [1] がよく知られている．しかし，これらだけでは本論文で意図する創造を捕らえきることはできない．

Pierce はアブダクションの例として，魚の化石が陸地のずっと内側で発見され，それを説明するためにかつてその一帯は海だったのではないかという仮説を立てることを挙げ，アブダクションによって得られる仮説が帰納的な一般化で得られる説明とは異なることを説明している [2]．ところでこのとき未知の生物の化石がみつかったらどうであろうか．我々人間は，未知の化石が発見されると，かつて我々の知っている生物の常識を超えた，恐竜とでも名付けるべき生物がいたのではないかという予測を自然に行うことができる．この予測の中には恐竜という新しい概念の創造が隠れている．また恐竜が爬虫類であるというような予想ができれば，他の爬虫類と同様に卵の化石が見つかるであろうという飛躍的な予測ができる．この飛躍的な帰結こそが，概念生成による創造的飛躍である．この例は概念生成を伴うアブダクションと考えることもできるが，アブダクションと創造的な概念生成は区別して考えるべきである．概念生成による飛躍を用いて実現される創造的問題解決は，観測事実を説明する仮説を生成できるだけでなく，観測されない目標状態を説明するための新たな概念を含んだ説明をも生成できるからである．詳しくは 6 章で述べる．

本論文では，知識を 1 階述語論理式で表現し，概念の生成を述語の生成として捉え，既存の知識に現れない新しい述語を生成する手法を提案する．帰納論理プログラミングの枠組みでユーザの意図にあった仮説を生成するために新述語を生成する構成的帰納 [3, 4] が提案されているが，これらは事例を説明するために一意的に生成されるもので，広く概念の創造をとらえたものではない．また，知識の上位概念である関係構造を用いて述語や関数を生成する手法が提案されている [5, 6] が，創造的飛躍を起こさず，それに触れられることもなかった．

以下，関係構造に基いた述語生成によって得られる新たな知識の性質について整理し，述語生成によって実現される創造的飛躍を定義する．そして，飛躍が起こる条件と，述語生成によって矛盾なく知識の対象領域を拡張することができることを示す．最後に創造的飛躍を用いた問題解決方法である創造的問題解決について論じ，それが人間の創造活動と深く関わることを説明する．

†東京理科大学大学院理工学研究科情報科学専攻
‡東京理科大学理工学部

2 知識と関係構造

本論文では，知識を関数，個体定数の現れないものに限定するが，これは一般の論理式を対象にした議論として一般性を失わない．関数や個体の現れる論理式は述語 $=$（等号）と存在記号を用いれば，対応する新しい述語を導入することにより関数，個体の現れない等価な論理式に変換することができるからである [6]．個体を引数のない関数と考えれば，例えば以下のアルゴリズムで n 変数関数 f の現れる式 M を，対応する新たな $n+1$ 変数述語 F を用いて f の現れない式に変換することができる．

アルゴリズム 1

1. M に現れる f の項のうち，引数に f が現れない項をそれぞれ
$$f(t_{11},\ldots,t_{1n}),\ldots,f(t_{m1},\ldots,t_{mn})$$
とする．
2. M に現れる項 $f(t_{11},\ldots,t_{1n}),\ldots,f(t_{m1},\ldots,t_{mn})$ をそれぞれ $y_1,\ldots,y_m$ に置き換えた論理式を M' とする．このとき，M を以下のような論理式に置き換える．
$\forall y_1,\ldots,y_m:$
$F(t_{11},\ldots,t_{1n},y_1)\wedge\cdots\wedge F(t_{m1},\ldots,t_{mn},y_m)\rightarrow M'$
3. M に f が残っていれば 2 へ戻る．
4. M を以下の論理式に置き換える．
$$\begin{aligned}&M\wedge(\forall x_1,\ldots,x_n,y,y':\\&F(x_1,\ldots x_n,y)\wedge F(x_1,\ldots x_n,y')\rightarrow=(y,y'))\\&\wedge(\forall x_1,\ldots,x_n\exists y:F(x_1,\ldots,x_n,y))\end{aligned}$$

以後，関数，個体定数の現れない 1 階閉述語論理式の集合を知識と呼ぶことにする．関係構造は自由な述語変数が少なくとも 1 つ現れる閉述語論理式の集合とし，関数，個体定数は現れないものとする．知識 Σ，関係構造 RS に対して，RS に現れる全ての述語変数を Σ に現れる述語に置き換える単純代入 Θ が存在して $\Sigma\subseteq RS\Theta$ であるとき Σ は構造 RS を持つという [5]．単純代入 [5] は，自由な述語変数を引数の数の等しい述語定数に置き換える代入である．単純代入は述語変数と述語定数の組の集合で表現され，異なる変数には異なる定数を割り当てる単純代入を重複のない単純代入という．本稿で扱う単純代入は，全て重複のない単純代入とする．

3 概念の生成

知識Σ，関係構造RS，述語変数Xが与えられたとき，新しい述語の現れる新しい知識S_{NEW}を以下のように考える．

RSに現れるX以外の全ての述語変数をΣに現れる述語に置き換える単純代入を$\Theta_1, \Theta_2, \cdots, \Theta_i, \cdots, \Theta_n$とし，$RS$の要素のうち$X$が現れるものの集合を$RS_X$とすると，それに対応する$S_{NEW_i}$は

$$S_{NEW_i} = RS_X(\Theta_i \cup \{NEW_i/X\})$$

のように定義される．

このようなS_{NEW_i}は，既存の知識Σと関係構造RS及び述語変数Xによって定まり，構造RS_Xをもち，またΣには現れない新しい述語NEW_iが現れる．関係構造を用いて生成される新しい述語の現れる知識は，S_{NEW_i}のように定義することができる．

生成される新しい知識S_{NEW}は，既存の知識Σと関係構造RS，述語変数X，単純代入Θ，さらに新しい述語記号NEWより一意に定まるため，概念生成をそれらの組$(\Sigma, RS, X, \Theta, NEW)$と定義することができる．

しかし，全てのS_{NEW}が概念生成としての新たな知識として適切なわけではない．S_{NEW}が新しい知識として適切かどうかを判断するための条件として以下の3つの性質について論ずる．

3.1 新規性

新規性は，新しく得られた知識が既存の知識Σの帰結とならない新しい知識であるという性質である．この性質は，$\exists s \in S_{NEW} : \Sigma \not\models s$と$\forall s \in S_{NEW} : \Sigma \not\models s$の二通りの解釈が考えられる．前者を弱い新規性，後者を強い新規性と呼ぶことにすると，弱い新規性を満たす概念生成$(\Sigma, RS, X, \Theta, NEW)$により生成される$S_{NEW}$に対して，$RS_0 \subset RS$であるような$RS_0$が存在して，強い新規性を満たす概念生成$(\Sigma, RS_0, X, \Theta_0, NEW)$により得られる$S'_{NEW}$が$Th(S_{NEW} \cup \Sigma) = Th(S'_{NEW} \cup \Sigma)$を満たすように構成できる．すなわち，弱い新規性はより小さい関係構造を用いて強い新規性で議論することができるため，本稿では新規性として強い新規性を考えることとする．

すなわち新規性を満たすS_{NEW}とは

$$\forall s \in S_{NEW} : \Sigma \not\models s$$

を満たすS_{NEW}である．

S_{NEW}が新規性を満たさないとき，S_{NEW}の要素はNEWが現れる式であるが，そのうち少なくとも1つは，NEWの現れないΣの帰結として得られる．これは，NEWがどのような概念であるかを定義するための情報がその式からは得られないことになる．もしS_{NEW}の全ての要素がΣの帰結となっているならば，NEWは$\Sigma \cup S_{NEW}$においてどんな性質も説明されないことになる．すなわち，ただでたらめに記号を追加したのと何ら変わりがない．この意味においても，新規性については弱い新規性ではなく強い新規性を考えることが重要であると考えられる．

3.2 無矛盾性

無矛盾性は，新しく得られた知識が既存の知識と矛盾しない性質である．無矛盾性を満たすS_{NEW}は，$\Sigma \cup S_{NEW}$を無矛盾な新しい知識とすることができる．無矛盾性は，$RS(\Theta \cup \{NEW/X\})$から帰結される論理式のうち，$NEW$の現れないもの全てについて，その否定が$\Sigma$の帰結とならないことが必要十分条件となる．

ところが無矛盾性を満たさなくても，もとの知識Σの代わりにΣの対象領域を拡張した知識を用いることによって矛盾なく新しい知識を加えることもできる．これは例えば，自然数を対象領域とする知識に引き算のような概念を加えることを考えたとき，その対象領域を負の数にまで拡張するような操作である．詳しくは5章で述べる．

3.3 健全性

健全性は，既存の知識Σと無矛盾でΣに現れる述語のみが述語として現れるいかなる論理式とも矛盾しないという性質である．健全性は，$RS(\Theta \cup \{NEW/X\})$から帰結される論理式のうち，$NEW$の現れないもの全てについて$\Sigma$の帰結となっていることが必要十分条件となる．

健全性を満たす知識を求める述語生成については，単調性が保障される．明らかに，健全であれば無矛盾である．

4 創造的飛躍

概念生成において生成される新しい知識が飛躍を実現するかどうかを吟味することは重要である．飛躍は未観測の事実や観測不可能な事実を予測することができるが，これは，閉世界仮説を用いたデータベース等にとっては必ずしも望ましいものではない．閉世界仮説のもとでは，明確に与えられている事例から帰結できない事例は偽とみなすため，仮説より得られた未知の事実と矛盾することがあるからである [7]．

新規性は，既存の知識に現れない新しい知識が得られるという性質であった．新規かつ健全な述語生成によって得られた知識はもとの知識の帰結とならない新しい知識である．ところで，このとき$\Sigma \cup S_{NEW} \models s$であり$\Sigma \not\models s$であるような$s$には必ず新しい述語が現れる．なぜなら$S_{NEW}$の要素には必ず新しい述語が現れ，そこから帰結として得られる新しい述語の現れない論理式は健全性よりΣの帰結となっているからである．このように新しい述語の現れる知識は未知の事実になるとは考えにくいため飛躍とは区別することにする．なぜならこの述語，概念はシステムが勝手に生成したものであるからである．

そこで創造的飛躍を$\exists s : \Sigma \cup S_{NEW} \models s$かつ$\Sigma \not\models s$かつ$s$には生成された述語$NEW$が現れないことと定義する．すなわち，健全な述語生成では，創造的飛躍は実現されない．

5 対象領域の拡張

無矛盾性が成り立たないとき，すなわち$\Sigma \cup S_{NEW}$が矛盾するときでも，対象領域を拡張するように知識を修正することによって概念生成を行うことができる．これ

は一見無駄に思えるかもしれないが，必ずしもそうではない．例えば虚数という概念を実数の知識に加えるとき，全ての数は二乗すると0以上という規則と矛盾することになるが，対象領域を複素数にまで拡張することによって矛盾なく加えることができる．

今，$C_\Sigma \subseteq \Sigma$ が $(\Sigma - C_\Sigma) \cup S_{NEW}$ が無矛盾かつ $C_\Sigma \cup S_{NEW}$ が矛盾であるとき，新たな1変数述語 inD を導入して

$$C'_\Sigma = \left\{ \begin{array}{l} \neg inD(x_{11}) \vee \cdots \vee \neg inD(x_{1l_1}) \vee s'_1 \\ \vdots \\ \neg inD(x_{n1}) \vee \cdots \vee \neg inD(x_{nl_n}) \vee s'_n \end{array} \right\}$$

であるような C'_Σ を考える．ここで，$s_1, \cdots, s_n$ は C_Σ の要素であり，$x_{j1}, \cdots, x_{jl_j}$ は s_j に現れる全ての束縛変数である．$s_1, \cdots, s_n$ を冠頭標準形で表し，それらから頭部を全て取り除いた式が $s'_1, \cdots, s'_n$ である．また，C'_Σ の各式には，対応する s_j の冠頭である $q_{j1}x_{j1} \cdots q_{jl_1}x_{jl_1}$ が頭部にあり，省略されているものとする．q_{jl} は $\exists$ か $\forall$ のいずれかであり，s_j における限定子と同じものである．このとき，$(\Sigma - C_\Sigma) \cup C'_\Sigma \cup S_{NEW}$ は無矛盾である．$inD(x)$ は x が元の知識の対象領域に含まれることを表す述語だと考えればイメージしやすい．

[6] で提案されている関数の生成は，関数の返り値の存在を仮定することに起因する矛盾によって対象領域を拡張する場合である．

今，以下のような関数と個体定数の現れる論理式の集合 Σ_0 が与えられたとする．

$$\Sigma_0 = \left\{ \begin{array}{l} \neg > (y, 0) \vee > (+(x, y), x) \\ > (x, 0) \vee = (x, 0) \\ \neg = (1, 0) \end{array} \right\}$$

Σ_0 には関数 $+$ と，個体定数 $0, 1$ が現れる．これにアルゴリズム1を適用した知識を Σ とすると，

$$\forall x, y \exists z : Plus(x, y, z) \in \Sigma$$

である．ただし，述語 $Plus(x, y, z)$ は関数 $+$ に対応する述語であり，$x + y = z$ を表している．この式は，$Plus$ という概念の解の存在性を表している．

さらに，述語変数，関数変数，自由な個体変数の現れる論理式の集合 RS_0 を考える．

$$RS_0 = \left\{ \begin{array}{l} \neg X_0(f(x, y), x) \vee \neg X_0(g(x, y), x) \\ \neg X_1(g(a, b), a) \end{array} \right\}$$

ここで f, g は関数変数であり，a, b は自由な個体変数である．これをアルゴリズム1によって f, g, a, b それぞれに対応する述語変数 F, G, A, B の現れる関係構造 RS を作る．このとき，G について述語生成を行うと，

$$S_{NEW_0} = \left\{ \begin{array}{l} \neg > (+(x, y), x) \vee \neg > (new(x, y), x) \\ \neg = (new(0, 1), 0) \end{array} \right\}$$

に対応するような S_{NEW} が得られる．ただし，new は新しい述語 NEW に対応する新しい関数である．新たな概念 NEW は加算 $Plus$ と対照的な減算のような概念となっていることがわかる．ところがこの S_{NEW} はそのまま Σ に加えると矛盾する．$Plus$ と同様に S_{NEW} には減算の返り値が存在することを表す式が含まれているからである．

$$\forall x, y \exists z : NEW(x, y, z) \in S_{NEW}$$

である．このとき，$C_\Sigma = \Sigma$ として述語 inD を用いることによって対象領域を拡張することができる．すなわち，$\Sigma' \cup S_{NEW}$ を無矛盾な新たな知識とすることができる．

関数の生成による存在性を利用した対象領域の拡張は，$C_\Sigma \subseteq \Sigma$ と $C_{RS} \subseteq RS$ が $C_\Sigma \cup C_{RS}(\Theta \cup \{X/NEW\})$ が矛盾する極小な集合であるとき，関数の返り値の存在性を表す文を含む C_{RS} が存在するときに実現される．

6 創造的問題解決

既存の知識から導くことができず，またその否定も帰結されないある目標状態が与えられたとき，飛躍を実現する概念を生成して目標状態を帰結させることができる．また，目標状態の否定が帰結されるときでも無矛盾性を満たさない概念生成によって拡張した知識のもとで目標状態を帰結させることもできる．このような概念生成による問題解決を創造的問題解決と呼ぶことにする．

この枠組みは観測された事実を説明する仮説を生成するアブダクションとよく似ている．ところが，創造的問題解決における目標状態は必ずしも観測された事実ではなく，それよりも未だ達成されない未観測の事実を実現するためにどのような概念が必要かを調べるものと考えることもできる．観測された事実の説明を生成するための概念生成を伴うアブダクションも創造的問題解決の一部と考えることができるが，説明が新たな概念を補うことにより生成されるのであれば，既存の述語を組み合わせて生成される通常よく知られているアブダクションによる仮説とは異なるものが得られると考えられる．以上の理由から創造的問題解決はアブダクションに限らないといえる．

例えば我々人間は以下のような創造的問題解決を行っている．

1. 空を飛びたいと思う．
2. 自分が空を飛べることを説明できない．
3. 鳥は空を飛んでいる．
4. 鳥が空を飛んでいることを説明する．
5. 鳥は羽があるから飛べるという説明に基づき，羽に代わる何かを作ろうとする．

1では人間が空を飛ぶという目標状態を設定し，2でその目標状態が説明できないことを確認する（または経験的に空を飛べることがわかっていない）．3で鳥が空を飛んでいるという事実が観測されているから，4でその事実を説明する仮説を生成する．これはアブダクションの概念と一致する．5では得られた説明から関係構造を抽出し，それに人間に関する概念を代入して人間が飛ぶという飛躍的な帰結が得られるような概念生成を行う．すなわち，人間が飛ぶという目標状態を達成するためにどのような概念が必要かという問題が整理される．その結果，空を飛びたいという目標しか与えられていないある意味であいまいな問題は，鳥の羽のような性質を持っ

た飛行機などの代替物を作るという具体的な問題に帰着できる．

この例は以下のような知識 Σ と目標状態 G で表現できる．

$$\Sigma = \left\{ \begin{array}{l} \forall x \exists y : Bird(x) \rightarrow Has(x,y) \wedge Wing(y) \\ \forall x : Human(x) \rightarrow \neg(\exists y : Has(x,y) \wedge Wing(y)) \\ \forall x,y : Has(x,y) \wedge Wing(y) \rightarrow Fly(x) \\ \forall x : Wing(x) \rightarrow WingBehavior(x) \end{array} \right\}$$

$$G = \forall x : Human(x) \rightarrow Fly(x)$$

G は Σ から導くことができない．そこで以下のような関係構造 RS と述語変数 $X = X_3$ において概念生成をすることを考える．

$$RS = \left\{ \begin{array}{l} \forall x \exists y : X_1(x) \rightarrow X_2(x,y) \wedge X_3(y) \\ \forall x,y : X_2(x,y) \wedge X_3(y) \rightarrow X_4(x) \\ \forall x : X_3(x) \rightarrow X_5(x) \end{array} \right\}$$

今，新規性と無矛盾性を満たす単純代入

$$\Theta = \{X_1/Human, X_2/Has, X_4/Fly, X_5/WingBehavior\}$$

を考えると，

$$S_{NEW} = \left\{ \begin{array}{l} \forall x \exists y : Human(x) \rightarrow Has(x,y) \wedge NEW(y) \\ \forall x,y : Has(x,y) \wedge NEW(y) \rightarrow Fly(x) \\ \forall x : NEW(x) \rightarrow WingBehavior(x) \end{array} \right\}$$

が生成される．この S_{NEW} からは $G = \forall x : Human(x) \rightarrow Fly(x)$ が得られる．これは Σ からは得られなかった帰結であるため，創造的飛躍を実現することにより目標状態を説明するための概念 NEW が新しく生成されたことがわかる．NEW はただでたらめに生成されたのではなく，鳥の羽のように $WingBehavior$ を満たす概念，すなわち鳥の羽と同じような性質を持つ概念であることがわかる．

7 おわりに

関係構造を用いて述語を生成することにより，創造的飛躍が実現できること，知識の対象領域を拡張できることを示した．これらを実現することは，人工知能システムにおいて知識の自動獲得や創造的な知識処理を実現することにつながると考えられる．

創造的飛躍が実現されるということは，表現の言い換えや，知識の整理のためだけに概念が生成されるのではなく，概念の生成によって新たな事実を帰結するという創造的な知識処理が可能になるということを示している．その飛躍が妥当なものであるかどうかを調べるためには，飛躍的帰結を検証し裏付けをすることが必要になると考えられる．これは飛行機の例に例えるなら，実際に飛行機に当たるものを作ってみることに相当する．創造的飛躍，創造的問題解決は実世界における人間の創造活動にも大きく関わっていると考えられる．人間の創造活動の全てがこの枠組みで捉えられるわけではないが，この創造的問題解決によって，人間が普段行っている創造活動の一部がモデル化できていることは興味深い．また，概念生成による対象領域の拡張は，既存の知識が対象とする領域だけでは問題を解決しにくいときに，自立的に対象領域を拡張することにより創造的な知識処理を助けるだけでなく，知識の自動獲得という問題にも深く関わると思われる．

しかし，これらの議論を実用的なシステムに組み込むにはまだ課題も多い．ある問題に対して概念生成を行うとき，どのような知識に対してどのような関係構造を用意し，そのうちのどの述語変数に着目するのかという問題について一般的な解があるとは考えにくく，簡単な問題ではない．

対象とする知識が定まっているときにどのような関係構造を用いて有意義な概念生成を行うかという問題について，例えば類似した知識を抽象化して関係構造を得る方法が考えられる．類推は推論の妥当性を対象とする知識と類似した知識の類似性に依る推論であるが，それと同様に概念の価値や飛躍の妥当性がその類似性に依るものになると考えられる．類推では問題の対象となる知識よりもすでによくわかっている知識をもとに推論が行われるのが基本的な前提であるが，概念生成において，もとの知識よりも単純な関係構造を用いた場合や，類似性に関係なく関係構造が知識の満たすべき型のような役割をする場合に有益な概念が生成されることがわかっている [5]．つまり，類推だけでは有益な概念生成全てを捕らえることはできないことがわかる．また，知識や関係構造が予め与えられていても，無矛盾性や健全性，新規性のチェックは一般には有限には行えず，概念を生成するアルゴリズムを構築することは簡単ではない．

知識の自立的な獲得と創造的な知識処理の実現に，概念の生成が貢献できることは少なくない．概念生成の実用化に向けて今後の成果が大いに期待される．

参考文献

[1] 井上克巳: アブダクションの原理, 人工知能学会誌, Vol. 7, No.1 , pp.48–59 (1992)

[2] Pierce, C. S. : Elements of Logic, in Hartshorne, C. and Weiss, P. eds. Collected Papers of Charls Sanders Peirce, Volume II , Harvard University Press, Cambirdge, MA (1932)

[3] Muggleton, S. and Buntime, R.: Machine Invention of first-order Predicates by Inverting Resolution, in Proc. of the 5th Intl. Workshop on Machine Learning, pp.339–352, ANN Arbor, MI (1988)

[4] Kijsirikul, B., Numao, M. and Shimura, M.: Discription-Based Constructive Induction of Logic Programs, AAAI-92, pp. 44–49, AAAI Press/MIT Press(1992)

[5] 金盛克俊, 延澤志保, 太原育夫: 知識の関係構造を用いた新しい概念の生成, 人工知能学会論文誌, Vol. 21, No. 5, pp.450–458 (2006)

[6] 金盛克俊, 延澤志保, 太原育夫: 知識の関係構造を用いた新しい関数の生成, FIT2006 第5回情報科学技術フォーラム 情報科学技術レターズ, Vol. 5 , pp.105–108 (2006)

[7] 齋藤 悠, 井上 克巳: 極小限定を用いた帰納推論, 人工知能学会論文誌, Vol. 21, No. 2, pp.143–152 (2006)