

## 問題解決支援における 階層的学習者モデルと指導について

ON A METHODOLOGY OF HIERARCHICAL STUDENT-MODELING AND TUTORING  
IN AN ASSISTANCE ENVIRONMENT FOR LEARNING BY PROBLEM-SOLVING

伊藤 紘二 伊丹 誠  
Kohji ITOH Makoto ITAMI

東京理科大学基礎工学部  
Science University of Tokyo

あらまし 本稿は、我々が開発している問題解決支援システムCAFEEKSにおいて、1ステップ毎に学習者が入力する問題解決状態の推移から、学習者の使った知識を推定して、その使用を評価し、事例に基づいた指導を行う評価指導モードを導入する方法について論じている。学習者モデルの構成と指導は、状況認知、事象記述、拘束知識、問題方略、の4つの記述型クラスの最下位の型のインスタンスを表わす事例、例題のテキストを利用する。その場合、従来から扱われてきた対象世界の知識に関する学習者モデルを構成するための前提として、知識を記述する枠組みの使い方と問題解決の方略という、知識自体を処理するための知識の把握が重要であることを強調した。そして、知識処理のための知識の把握においては、事例を用いざるを得ないことから、これが、また対象世界の知識の把握を前提とするというように、相互に依存しあっていることを示した。こうした相互依存性のために、学習者モデルの構成とそれに基づく指導は、独立には行い得ず、ある型の知識の評価にとって前提となる知識については、その評価と指導が行われてから、初めて、問題となっている評価と指導が可能になるというように、評価と指導がインタレースして行われなければならないことを示した。

キーワード 問題解決支援環境 知的CAI 学習者モデル 指導方略 知識ベース、知識工学、オブジェクト指向

### 1. はじめに

知的CAIの開発においては、知識表現の制約から、初心者がその主題に接近するのに必要なプリミティブにまで知識を分解することが難しいために実現が困難な分野が多い[1]上、狭い主題に対するシステムでさえ、開発に多大の時間がかかる。

一方、ハイパーメディアのように、テキストベースを用意し、テキスト間の関連を辿りながらこれを探訪することのできる環境は、学習支援としても、また知的生産の支援としても、極めて有効であると考えられている[2][3]。しかし、従来のハイパーメディアにおけるように、編集者が、2つのテキストの一方の部分から他方の部分(あるいは全体)へリンクを作り付けておく方法では、学習者が迷いやすい上に、テキストがグループとして持っている様々な型の階層的ならびに構造的関係を捉えることはできない[3]。仮に、作り付けの仕組として多くのテキストの間のこのような関係を表わそうとすると、組合せ的爆発は避けられない。

そこで、我々は、テキストベースがもっている制約のない表現力を利用しつつ、作り付けのリンクを辿らせる代りに、テキストの背後におかれた手がかり知識表現が

構成する知識ベースシステムによって、利用者の問い合せに応じたダイナミックなテキスト検索を可能にするシステム-CAFEEKS(Computer-Assisted Free Exploration of Knowledge Structure) - [11][12]を開発してきた。

CAFEEKSは、学習者に主導権をもたせたシステムであるが、学習者が、テキストの森のなかで道に迷うことを防ぎ、盲目的な試行錯誤を避けて、方略に基づいた思考を導くために、問い合せとしては、はっきりした問題の型を指定したゴールと条件を記述させ、それに応じた方略に導かれて検索が行えるようになっている。

それでもやはり、学習者モデル、即ち学習者による知識単位での理解状態、を測りつつ、適切なテキストへ学習者を導く仕組を持たないと、一つのシステムで、様々な水準の学生に柔軟に対応することは難しい。

ところで、従来提案され研究されてきた学習者モデルは、知識の理解というものが、問題解決過程とは切り離して、個々の知識について、独立に測定できるかの様な扱いをされてきた。

そこで、本稿では、まず、学習者モデルの構築が、問題解決能力の指導の為に行われるのであるならば、問題

解決のプロセスを考慮した相互依存的な階層的モデルを採用すべきであることを論ずる。その結果、知識については、一方で、対象世界に関する知識、他方で、知識の記述に使われる枠組みとその使い方ならびに問題解決方略という、知識を処理するための知識とを区別すべきであり、この2種類の知識をあわせた知識相互の間に、互に他を前提としあう関係があることを指摘し、学習者モデルの推定と指導をインターレースしてゆくことが、指導の為に不可欠であることを示す。

続いて、CAFEEKSのようなテキストベースのシステムにおいて、相互依存的で階層的な知識記述型のインスタンスとして用意されたテキストを利用することにより、知識処理のための知識については、汎用の診断問題に対する応答の評価によって知識型単位の学習者モデルを構成し、かつ、テキストを利用した指導を行うことが出来、また、対象世界知識については、問題解決過程において、学習者に解決状態の変化を入力させることによって、学習者の利用している知識を推定し、評価を行い、例題を用いた指導を行うことが出来ることを示す。

## 2. CAFEEKSにおける知識記述の型[11][12]

CAFEEKSにおいてテキストの検索を支援する知識ベースシステムは、主として、テキストに対する手がかり知識記述や問題記述のための記述枠の階層に、型に依存する支援手続を組入れたクラスオブジェクトと、これを用いた手がかり知識の記述や問題の記述をインスタンスとしてもつオブジェクト指向[4]により構成されている。なお、システムが支援に必要とするが、探訪者には必ずしも意識させない知識も、やはり、これらの記述枠を用いて記述される。

知識ベースクラスの他に、問題解決支援の問い合わせセッションを管理する assistSessionクラス、問題解決の各ステップの状態を保持し、自由なやり直しを可能にするための assistProcessクラスなどがある。

知識ベースクラスは、つぎの4つの記述枠サブクラスをもち、それぞれのサブクラスのなかで、記述枠クラスの階層がつけられる。

注意してほしいのは、ここでいう記述枠とその階層は、あくまで、人間が自らも自然の一部として、環境を把握し、行動の指針としての知識を形成し、これを利用するための記号処理の便宜の為に、経験的に構成し、言語体系の違いをも越えて社会的に共有されているとみなされるような枠組み、階層であることである。従って、記述

型とその階層の構造や取扱いかたど、問題解決の方略を含めて、ここでは、知識処理の為に知識とよぶことにし、対象世界で成立する事柄を記述した対象世界に関する知識と区別することにする。後者には、事象型のインスタンスとしての事象知識と、拘束知識型のインスタンスとしての拘束知識とがある。

なお、言葉を扱う場合の約束事は、言語現象を対象世界とする対象世界に関する知識である。

(以下、一部、「状況意味論」[5]から、その概念を借りている。)

### (1) 状況認知型

ある観測対象あるいは観測結果がある認知(知覚的あるいは概念的)カテゴリ(もの、行為、特性、関係など)に属するという状況認知を表現する枠組み。茶碗であるとか、移動するとか、赤いとか、合同である、など。

### (2) 事象記述型

ある状況認知型の認識が、ある時区間、ある場所で成立する(した、するだろう)という記述を表現する枠組み。歴史上の事実、予測、因果関係の因あるいは果として想定される事象など。

### (3) 拘束知識型

複数の状況認知型ないし事象型の認知を想定したとき、その間にある拘束が成立するという記述を行う枠組み。拘束には、自然的拘束と、約束による拘束がある。幾何の定理、日常の事物に関する観測値の間の等式関係、因果関係、手続の適用条件と結果などの知識(事実としての、あるいは仮説としての)をインスタンスとし、その記述のための型をクラスとする。

### (4) 問題方略型

いろいろな型の問い合わせ/問題を記述する枠組み。証明問題、未知量決定問題、設計問題などの型。問題型のそれぞれには、それを解くための一般に複数の方略-の型の知識を探すべきか、どんな副問題を解くべきかなどの記述からなる分節された陽な表現-が、クラス定数として、記述される。下位の型は、一般に、そこに書かれる方略のほか、上位の型の方略をも継承できる。

記述枠をさらにプリミティブな記述枠(の組合せ)に置き換えるための情報と手順は、各記述枠内に置かれる。ただし、そうした情報の内、対象世界知識の類は、独立した拘束型インスタンスとして、記述され、引用側の記

述枠からは、ポイントで、これにアクセスできるようにする。

### 3. 問題解決過程と階層的学習者モデル

学習の目的は、様々なタイプの問題解決の能力を育成することに在るのであるから、学習者モデルと、それに基づく指導方略の枠組みは、問題解決において必要な認知的プロセスを分析し、その各要素プロセスにおいて、学習者はつまづき得ると考えて、これを設計すべきである。

問題解決過程の分析は、CAFEEKSの設計の基本でもあったが、次の様なプロセスをとることが知られる。

#

問題の型の検索

問題の記述

問題記述枠の適用、

状況認知／事象記述型の検索と適用

方略の選択

方略の指定する型の拘束／事象知識の検索と適用、

拘束／事象知識の検索と適用

状況認知／事象記述型の検索と適用

副問題の生成

#へ再帰

とくに、問題記述のコンテキストの記述の為の適切な状況認知／事象記述型の検索、および、解決段階における適切な知識の検索の為には、つねに、つぎの2つのステップが必要である。

- ① 事例が属する型の候補を挙げること
- ② 事例が着目した型に属することの認知

事例の方は、一般に複数の観察記述の集合としてあたえられ、型の方は、型の名前、構造とともに、典型事例が与えられている場合と内包記述が与えられている場合とがあり、内包記述に関しては、定義が与えられている場合と、そうでない場合とがある。そこで、この2つのプロセスは、具体的には、つぎのように行われる。

- ① について：型に関するプリミティブな内包記述ないし典型事例に関するプリミティブな観察記述と、事例に関する観察記述のプリミティブへの展開との部分的な共有をみる。
- ② について：定義記述のある型の場合は、事例に関する

観察記述から定義記述を証明出来る型を選ぶ。定義記述のない型の場合は、①で得た共有の程度を候補の間で比較する。

以上の分析から、学習者のつまづきの原因は、次のいずれかであることがわかる。

#### I. 対象世界に関する知識におけるもの

公認された拘束知識あるいは事象知識を知らない、あるいは、推論によって導くことができない。あるいは、誤って覚えている。

#### II. 知識処理の為の知識に関するもの

事例の集りにおいて、事例の各々が、知識記述階層のどの型（とくにプリミティブな）に属し、どの型に属さないかの判断が不適切であったり、型の構造や、型の取扱に関する手続を知らない、あるいは、それを公認されたように把握していない。

この内、I.は、従来の学習者モデルで専ら扱われてきたものであるが、II.は、たとえ、対象世界に関する知識の記述が与えられても、それを問題解決に使うことが出来ないという、より本質的な欠陥であり、これまでの学習者モデルが等閑に附してきた点である。

それぞれの知識記述型について、つまづきの内容を具体的に分析してみる。

##### (1) 状況認知型の場合、

II.に該当するものだけがある。ある状況認知カテゴリの定義／慣例では該当しない対象をそのカテゴリのものとして判断したり、学習者の持っている状況カテゴリに、あるべき属性スロットが無い、値の在り得ない属性スロットがある、あるいは、スロットに関する公認された手続がない／間違っている等が該当する。

結果として、事象記述、拘束知識適用、問題記述などにおける不適切さを招く。

##### (2) 事象記述型の場合

I.とII.がある。インスタンスとしての事象知識自体が適切でないのがI.に当る。また、(1)でのべた状況認知の型の使用の問題と共に、時間、あるいは場所にかんする取扱が正しくない場合がII.に当り、事象記述、拘束知識適用、問題記述などにおける不適切さを招く。

### (3) 拘束知識型の場合

I., II. の両方がある。I. に該当するのは、インスタンスとしての知識の欠如や誤った知識であって、知識の誤りとしては、拘束を受ける状況認知/事象記述型の集りが、公認のそれに対して不足/過剰、ないし異なっているもの。

II. に該当するのは、型の定義/慣例では該当しない拘束知識をその型のもものと判断するものや、探索の仕方や適用の仕方が欠如している、ないし不適切であるもの。結果として、方略の解釈の不適切さ、知識適用の不適切さを招く。

### (4) 問題方略型の場合

II. だけがある。具体的な問題がどの型に属するかの判断が不適切であるもの、方略が欠如している、あるいは不適切なもの。結果として、問題解決のステップが踏出せない。

ここで注意すべきことは、拘束知識型の把握の適切さの評価即ち学習者モデル形成は、それに用いられる状況認知/事象記述型の把握の適切さを前提としており、また、問題におけるゴールと条件の記述の部分の能力の評価については、やはりそれに関係した状況認知/事象記述型の正しい把握を、また、方略の部分の評価は、関係した拘束型の正しい把握を前提としている、というように、それぞれの型に対する学習者モデル自体、その前提となる把握が成就した上でないと、そもそも作ることすらできないということである。

とくに、対象世界に関するモデルをつくるにあたっては、関係する型に関する知識処理の為の知識における欠陥は、既に指導によって矯正されていると仮定しないと、システムがもっている対象世界知識の記述と学習者が持っているそれとは、記述上の対応がつかず、学習者モデルが作れない。

## 4. CAFEEKSにおける評価指導モードの導入

### - 階層的学習者モデルと指導 -

CAFEEKSにおいて、

イ. コンサルテーションモード

ロ. 評価指導モード

の2つのモードを設け、学習者は、解決状態のどのステップからでも、これらのモードのいずれかをも選ぶことができるものとした。

イ. は、従来開発してきたモードであって、問題解決

の各ステップにおいて、記述の為の型と、解決に使えるような対象世界知識の候補を提供する。

ロ. は、今回提案するモードであって、問題解決の各ステップにおいて、学習者は、自らのもつ知識に従って、各ステップの遂行を試み、システムが、それを評価して指導するモードである。

ロ. のモードにおいても、CAFEEKSは、学習者を、特定の解法のコースに強制することはしない。その代わり、解決の各ステップにおいて、その直前の解決状態と、学習者に入力させた直後の解決状態から、学習者が使用したであろう対象世界知識の候補を推定し、それぞれについて、評価をして、コメントを与え、学習者が、その一つを選ぶと、その知識における誤りの矯正を指導する(後出4.1参照)。

学習者が使用した知識候補を推定するには、解決状態の変化に対して、部分的な整合のとれる知識を検索するが、整合がある程度以上とれるような知識がみつからないときは、関連した知識処理のための知識の誤りを疑って、そちらの診断と指導を行う(後出4.2参照)。その後、解決状態を入れ直させて、対象世界知識の推定をやりなおす。

イ. のモードでは、不完全な問題記述からスタートしても、システムから与えられる記述型や知識候補による制約によって、学習者が補完や修正を行えるが、ロ. のモードでは、解決状態の変化に基づいて、システムが知識候補を推定するので、問題記述が不完全であると、推定が難しい。従って、問題は、システムから与えられるか、あるいは、少なくとも、問題記述が安定してからあとで、このモードに入る必要がある。

さて、知識ベースにおける階層構造は、対象世界の理解の効率から考えて、ある型のすぐ下(属性値のカテゴリわけによる下位分類も含まれる)の階層においてならば型どうし(一般にそのような組は、どの属性に着目するかによって、複数ありうる)は、通例、排反であるように定義されるのであって、同じ対象について同時に当てはまることはない。

同時充足する事例をもつような型の組があった場合は、否定を含む組合せによって、排反な型を作って置く。

以下、このような階層構造を前提とする。

CAFEEKSは、テキストベースのシステムであり、一方、学習者の理解状態の評価と指導は、事例に基づいて行われるのが望ましい。そこで、4つの知識記述型の

階層の最下層のカテゴリに対する事例のテキストを用意しておく。このテキストは、その内容として、それぞれの型に属する事例とその型の構造に従ったスロット値、プリミティブへの分解、型に属する手続の実行例などをもって、必要に応じて、必要な部分を提示できるものとする。

#### 4.1 対象世界知識に関する学習者モデルの構成法と指導について

3. で述べたように、対象世界知識に関する学習者モデルをつくるにあたっては、関係する型に関する知識処理の為の知識における欠陥は、既に指導によって矯正されていなければならない。必要があれば、その場で、このような欠陥に対する指導に戻ることが必要である。

さて、事象知識であれば、その記述自体の誤り、拘束知識であれば、拘束を受ける状況認知/事象記述が公認されたものに比べて、不足/過剰/異なる、といった欠陥がありうる。

先に述べたように、システムは、解決の各ステップにおいて、その直前の解決状態と、学習者に入力させた直後の解決状態とから、学習者が使用したであろう対象世界知識の候補を推定し、それぞれについて、評価をして、コメントを与え、学習者が、その一つを選ぶと、その知識における誤りの矯正を指導する。

特定の対象世界知識の指導には、例題のストックを用いる。例題には、解決のプロセスのサンプルが記述されていて、使われている対象世界の知識が記されている。そして、知識のほうから、それを使っている例題を検索することが出来る。従って、ある知識の利用について学習者を指導したい場合には、それ以外の使われている知識の中で評価が済んでいないものが成るべく少ないような例題を検索し、その例題の解決を追跡させ、当該知識が使える場面きたら、解決過程を伏せて、学習者自身に適用を行わせる。

#### 4.2 知識処理の為の知識に関する学習者モデルの構成法と指導について、

まず、階層のなかのある型を学習者が正しく認識しているかどうかは、つぎの2つを確認することによって可能となる。

- (a) 当該型に属するが、すぐ下の型では排反な型に属する複数の事例を、当該型のもののみなすことができる。
- (b) 当該型のすぐ上の型の下に当該型とならぶ型で、当該の型と両立しないような型に属する事例を、当該型とは異なった型のもののみなすことができる。

そこで、ある型の認識をチェックするには、(a),(b)に掲げたような事例を検索して提示し、当該型に属するものと属さないものに分類させればよい。指導は、すぐ上の型の下に並ぶ型を並列して提示し、どちらかといえばどれに属するかという判断を、プリミティブを用いた事例の内包記述によって誘導するとよいだろう。

次に、当該型の構造についてチェックするには、当該型に属するが、すぐ下の型では排反な型に属する複数の事例のスロット値と、当該型の構造とを結びつけさせる。指導は、構造の由来を、事例を用いた対象世界知識によって解説する必要がある。

また、当該型に付加されている手続については、条件とゴールを与えて、実行させる。指導としては、この事例集合のなかの一つの事例における手続の実施例を示し、これに倣って、事例集合中の別の事例について当該手続を実行させるのがよいだろう。

実際には、4つの知識記述型のそれぞれについて考えると、これらのチェックに必要な事例の内容の理解自体に、その型に依存して、知識処理のための知識として他の型の使用に関する把握、そして/あるいは、対象世界の知識に関する把握をクリアしている必要が在る。

問題方略型であれば、事例は、例題とその解決過程の例であり、問題記述と方略の理解のためには、既に知識処理の為の知識として、拘束知識の型、状況認知/事象記述の型の把握、そして、解決に用いられている対象世界知識である拘束知識や事象知識の把握をクリアしていなければならない。

拘束知識型であれば、事例として対象世界知識の拘束知識の把握が必要であり、型自体の理解には、知識処理の為の知識として状況認知/事象記述の型の把握をクリアしていなければならない。

事象記述型であれば、事例として対象世界知識の事象知識の把握が必要であり、型自体の理解には、知識処理の為の知識として、状況認知型の把握をクリアしていなければならない。

状況認知型であっても、その構造や手続の多くは、対

対象世界知識に由来するので、その把握には、関係した対象世界知識の把握が前提となる。

## 5. むすび

本稿では、我々が開発している問題解決支援システム CAFEKS において、従来開発してきたコンサルテーションモード、即ち、問題記述の型と問題解決に使える知識の候補を提供するモード、に加えて、1ステップ毎に学習者が入力する問題解決状態の推移から、学習者の使った知識を推定して、その使用を評価し、事例に基づいた指導を行う評価指導モードを導入する方法について論じた。

学習者モデルの構成、即ち学習者の理解状態の評価、と指導は、あくまで、事例と例題によって行われる。CAFEKS においては、状況認知型、事象記述型、拘束知識型、問題方略型、の4つのクラスの知識記述型の最下位の型のインスタンスを表わす事例のテキストの集りを利用する。

評価指導モードにおいては、従来学習者モデルの対象とされてきた対象世界の知識に関する学習者モデルを構成するための前提として、知識を記述する枠組みと、問題解決の方略という、知識自体を処理するための知識の把握が重要であることを強調した。そして、知識処理のための知識の把握においては、事例を用いざるを得ないことから、これが、また対象世界の知識の把握を前提とするというように、結局、相互に依存しあっていることを示した。こうした相互依存性のために、学習者モデルの構成—評価—とそれに基づく指導は、独立には行い得ず、ある型の知識の評価にとって前提となる知識については、その評価と指導が行われてから、初めて、問題となっている評価が行われ得て、指導が可能になるというように、評価と指導がインタレースして行われなければならないことを示した。

本稿は、評価指導モードの提案にとどまったが、このモードのプロトタイプを構成して、可能性を確かめることが課題である。

謝辞： 文献[6]~[10]からは、様々な示唆をえた。これらの著者のほか、磯本征雄、対馬勝英、大下真二郎、山本米雄、辻井潤一の諸氏と本稿の著者、伊藤を含む文部省科学研究費総合研究A(課題番号 63302071)の研究グループのメンバによるディスカッションは、問題解決支援、知識の階層、学習者モデル、指導方略等について考察を深める手がかりを得る上で貴重なものであった。

メンバ諸氏に感謝する。

## 参考文献

- [1]Wenger,E: Artificial Intelligence and Tutoring Systems, Morgan Kaufmann (1987)
- [2]Yankelovich,N.,Haan,B.J.,Meyrowitz,N.K.,Drucker,S.M. : "Intermedia: The Concept and the Construction of a Seamless Information Environment," IEEE Computer, Jan. 1988, pp.81-96
- [3]Halasz,F.G., "Reflections on Notecards: Seven Issues for the Next Generation of Hypermedia Systems," Communications of the ACM, vol.31,no.7, July 1988. pp. 836-852
- [4]Cox,B.J.: Object-Oriented Programming- An Evolutionary Approach, Addison-Wesley,1986
- [5]J.Barwise,J.Perry: "Situations and Attitudes," MIT Press,(1983)
- [6]竹内 章、大槻説乎: "摂動法による学習者モデル形成と教授知識について",情報処理学会論文誌, vol.28, no.1 (1987)
- [7]池田 清、溝口理一郎、角所 収: "学生モデル記述言語SMDLと学生モデルの帰納推論アルゴリズムSMIS",電子情報通信学会論文誌, vol.J72-D-II,no.1 (1989)
- [8]岡本敏雄、松田 昇: "知的CAIにおける幾何の証明計画の認識と学習機能について",情報処理学会論文誌,vol.30,no.8 (1989)
- [9]渡辺成良、桑田喜隆、水田哲生: "回路演習解答文の誤り発見のための答案診断システム",人工知能学会誌, vol.3,no.3 (1988)
- [10]Yuichiro Anzai: "Architecture for Problem Understanding in Physics Problem Solving", presented at the 3rd Intern. Conf. on AI and Education, LRDC Univ. of Pittsburgh (1986)
- [11]伊藤、伊丹: "テキストベースの自由探訪を支援するシステム—手がかり表現作成支援と手がかり表現の利用について—", 情報処理学会シンポジウム「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」講演論文集 pp.135-144, 1989
- [12]Itoh,K., Itami,M.: "A Computer-Assisted Knowledge Exploration Environment for Learning by Problem Solving", Proc.of International Conference on Advanced Research on Computers in Education (accepted), 1990