

導出過程の変換を用いた類推の実現と 知的CAIへの応用

中村 祐一 平島 宗 上原 邦昭 豊田 順一
大阪大学産業科学研究所

学生が行き詰まった場合や誤りを犯した場合に、原理に戻って教えることは効果的であり、実際の教育でもよく行われる。こうした教育法を実現するためには、知的CAIにおけるドメイン原理の扱いについて考察しなければならない。本論文では、ドメイン原理を用いた説明機能について考察し、質の高い説明を生成するための枠組みについて検討する。質の高い説明を生成するためには、原理に基づく説明以外に学生の理解に応じた説明が必要であり、このことはドメイン原理上での学生モデルの構築を示唆する。しかしながら、ドメイン原理は詳細度の高い知識であり、モデル生成は困難であると考えられる。こうした点を考慮して、著者らは学生の誤った類推を対象としてモデル構築を行う機構を開発している。本モデル化機構ではドメイン原理上での類推を導出過程の変換と呼ぶ手法を用いて実現しており、従来の類似性に基づく変換と組み合わせて使うことにより、ドメイン原理上での学生モデルを構築することができる。

**Analogical reasoning by the derivational mapping,
and its application to Intelligent CAI system**
Yuichi Nakamura, Tsukasa Hirashima, Kuniaki Uehara
and Jun'ichi Toyoda
The Institute of Scientific and Industrial Research
Osaka University
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567, JAPAN

When a student makes errors, the tutor are required to explain the target matter based on the domain principle. To provide the explanation function with the system, the domain principle has to be built in the tutoring system. This paper discusses a new framework of generating high quality explanation in the Intelligent CAI system. For this purpose, the explanation has to be done according to student's level. Then not only the explicit domain principle but also the student modelling over the domain principle, is required. The student modelling, however, isn't easy because the grain size of the domain principle is too small. To avoid such difficulty, we are now developing a new modeller based on analogical reasoning. The modeller includes two analogical reasoning methods; the one is our defined the derivational mapping that can realize analogical reasoning over the domain principle and the other is traditional analogical mapping. With these methods, the modeller can construct student model over the domain principle.

1. 序論

学生が行き詰まった場合や誤りを犯した場合に、原理に戻って教えることは効果的であり、実際の教育でもよく行なわれる。こうした教育法を実現するためには、知的CAIにおけるドメイン原理の扱いについて考察しなければならない。ドメイン原理の考え方¹⁰⁾は、主にエキスパートシステムの研究から発展してきた。一般に、専門家の持つ知識には経験的知識と理論的知識があると考えられ、特に後者をドメイン原理と呼ぶ。ドメイン原理の定義は明確に与えられているわけではないが、一般には経験的な知識の正当性を示すための知識をドメイン原理と呼ぶことが多い。⁶⁾一方、こうしたドメイン原理の考え方を知的CAIに利用することは、原理に基づく説明を生成できるという観点から、教育的有効性が高いと考えられる。本論文では、知的CAIのためのドメイン原理を用いた説明機能について考察し、質の高い説明を生成するための枠組みについて検討する。

知的CAIにおいて質の高い説明を生成するためには、単に原理に基づく説明を生成するばかりでなく、学生の理解の程度に応じた説明が必要である。したがって、ドメイン原理に関する学生モデルを構築することが必要となってくる。しかしながら、ドメイン原理は詳細度の高い知識であり、モデル構築のためには効率の面で大きな問題がある。⁴⁾⁹⁾こういった観点から、著者らは学生の誤った類推を対象としてドメイン原理上でのモデルを構築する機構を開発している。⁸⁾本モデル化機構では、ドメイン原理上での類推を導出過程の変換と呼ばれる手法を用いて実現しており、従来の類似性に基づく変換³⁾と組み合わせることで、ドメイン原理上での学生モデルを構築することができる。本論文で述べる手法は、著者らの開発しているIPPS (Intelligent Practicing Problem System)⁷⁾の中で用いられており、対象領域として物理問題を扱っている。

2. 教育例の分析

知的CAIシステムが知的に振舞うためには、複数の知識とこれらの知識を制御するための機構が必要である。ここでは、学生が誤りを犯した場合に、システムがどのような説明を行なえばよいかを考察し、質の高い説明を生成するための要素について検討する。

図1に典型的な教育例を示す。ここでの教育例は光についてのドップラー効果の問題を扱ったものであり、システムは公式の導出過程を基に説明を行なっている。この様な「原理に戻って教える」という方法は学生にとって分かり易く、実際の教育にお

問題1 観測者から見た光源の相対速度は v で、光源は観測者に近づいている。光速は c で、振動数は ν である。観測者の観測する振動数を求めよ。

学生: ドップラー効果の公式より
$$\nu' = c\nu/(c-v)$$

Tutor:
光源の速度は相対速度で与えられているから、観測者自身も動いていると考えらる。したがって、観測者が静止している場合を仮定しなければならない。

ある時間の光源の位置を S_0 とする。その瞬間発した光波は、 S_0 から V の点 A に達する。このとき、光源は S_0 から v の点 S に達する。この1秒間に、光源の発した波の数は ν 個である。 S と A の距離は

$$SA = S_0A - S_0S = c - v$$

S と A の間には、 ν 個の波が存在するから、観測される光波の波長は

$$\lambda' = SA/\nu = (c-v)/\nu$$

観測される波の振動数を ν' とすると、次の式が成立する。

$$\nu = \nu'\lambda'$$

これらの式より、

$$\nu' = c\nu/(c-v)$$

ν' は静止した観測者から見た光波の振動数である。動いている観測者から見た光波の振動数を求めるためには、2人の観測者の間の時間の進み具合を考慮しなければならない。したがって、次のようになる。

$$\nu'' = c\nu(1-v^2/c^2)^{1/2}/(c-v)$$

図1 典型的な教育例

いてもよく使われる。さらに、注意すべきことは、システムの生成した説明のうち②と④が特に強調されていることである。このことは学生の理解と関係しており、強調されている部分は学生が理解していない項目に対応している。また、②に着目すると、システムは相対速度の問題を解くための戦略を用いて問題を解いていることが分かる。この中で、システムは学生が相対速度の問題を解くための戦略を知っていると仮定し、学生にとって既知の戦略を用いて説明を生成しようとしていることが分かる。

以上の考察から、システムが質の高い説明を生成するためには、以下の三つの要素が必要だと分かる。

- 1) 原理に基づく説明を生成するためには、システムが公式を導出する機能を持たなければならない。したがって、システム内にドメイン原理を明示的に用意しなければならない。
- 2) 公式の導出過程を説明する場合、システムは学生の理解している部分と理解していない部分を区別できなければならない。したがって、ドメイン原理についての学生モデルが必要である。
- 3) 既知の解決戦略を使った方が学生にとって分かり易い。したがって、システムはよく使われる解決戦略を明示的に持っていなければならない。

以上の三点を基に、著者らは図2に示すような学生

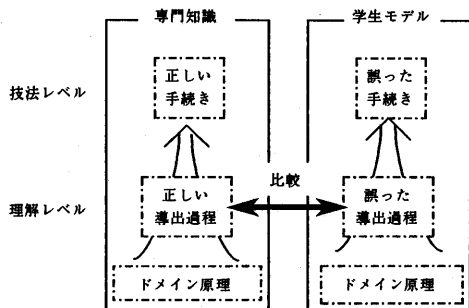


図2 技法レベルと理解レベル

の誤り原因同定の枠組みを提案している。この図に示すように、本システムでは手続きの知識とドメイン原理という二種類の知識を扱っている。これらの知識を教育的観点から考察すると、手続きの知識は学生の持つ問題解決技法に対応し、ドメイン原理に基づく公式の導出過程は学生の理解に対応していると考えられる。この考えに基づくと、学生の誤りを同定する場合、理解レベルでの比較、すなわち正しい導出過程と誤った導出過程の比較が必要である。しかしながら、学生の誤った導出過程を推論するためには詳細な知識が必要であり、これらの知識の組み合わせを考えると誤った導出過程の推論は一般に困難であることが予想される。こうした問題点を解決するために、IPPSでは学生の誤った類推を考え、ドメイン原理に基づく類推を行なうための機構を実現することにより、学生の誤った理解を誤った導出過程として推論できるようにしている。

3. 類推による問題解決

ここでは、以下の章で必要となる類推の概念¹⁾について概説する。図3に類推による問題解決の概略図を示す。図の中のターゲット知識とは与えられた問題を解くための知識であり、ベース知識とは類推を行なうために選択された既知の知識である。本システムでは、類推を行なうための知識として、手続き的知識とドメイン原理を用いている。これにより、技法レベルでの類推と理解レベルでの類推が実現可能となっている。

技法レベルでの類推は、図3の手続き1を変換して手続き2を導くことにより行なわれる。このレベルでの類推は、水と電気や太陽系と原子構造等の領域に対して適用可能であり、従来の類似性に基づく変換 (Analogical mapping) により行なうことができる。例えば、水と電気の例において、水流と電流が対応していることが定義されると、水流についてのキルヒホッフの法則の手続きを変換することにより、電流についてのキルヒホッフの法則の手続きが

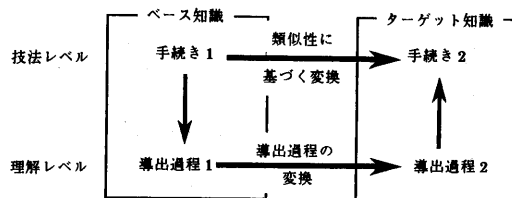


図3 類推による問題解決

導出される。これに対して、対応関係を定義しただけでは、類推を行なえないような場合もあるが、このような場合には、理解レベルでの類推が必要となる。¹⁾²⁾例えば、音波についてのドップラー効果の手続きから光波についてのドップラー効果の手続きを類推するためには、理解レベルでの類推が必要である。理解レベルでの類推を実現するために、著者らは導出過程の変換と呼ぶ手法を用いているが、この手法については、6章で詳しく述べる。

一般に、表層的な類似性 (surface similarity) は深層的な類似性 (deep similarity) よりも抽出しやすいが、正しく類推を行なうためには深層的な類似性の方が重要であることが指摘されている。³⁾しかしながら、初心者は表層的な特徴に捕らわれやすく、深層的な特徴にはあまり注意しない。学生は問題解決においては初心者と見なすことができるので、学生が深層的な類似性を考慮せず、表層的な類似性のみを考慮して誤ることがよくあると考えられる。前述した二つのレベルでの類推を実現するための枠組は、こうした誤りを扱うことを目的としている。この中で、技法レベルの類推は表層的な類似性に着目した類推に対応し、理解レベルの類推は深層的な類似性に着目した類推に対応する。すなわち、学生の誤りは理解レベルでの類推を考慮しなければならない場合に、技法レベルの類推を使う場合に起こると仮定されている。この仮定に基づくことにより、本システムは学生の理解レベルの誤りを同定することができる。

4. 学生の誤った類推

類推を用いて問題解決を行なう場合、類似性に基づく変換が使えない場合もある。こうした場合、理解レベルの類推を考慮して問題を解くことが必要となるが、学生は類似性に基づく変換を用いて誤ることがよくある。ここでは、こうした学生の誤った類推がどのようにして起こるのかについて説明する。

学生の誤った類推について説明するために、学生が図1の問題1を与えられたと仮定する。この問題はドップラー効果の手続きを用いて解くことができるが、この手続きを図4の手続き1に示す。この手続き1は学生が生成すべきターゲット知識である。

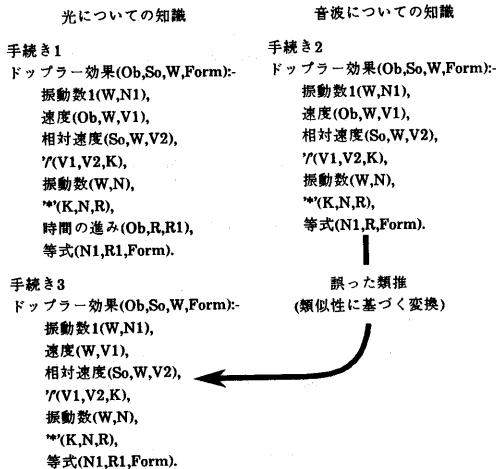


図4 ドップラー効果の知識

これに対して、図の中の手続き2は類推を行なうためのベース知識であり、以下の問題2を解くための手続きである。

問題2 音源が速度 v で観測者に近付いている。音波の速度は c で振動数は ν である。観測者の観測する振動数はいくつか。

手続き2から手続き1を類推するためには、理解レベルでの類推が必要であるが、学生は技法レベルの類推、すなわち類似性に基づく変換を用いて手続き3を生成し誤ることが考えられる。⁵⁾

学生がこのような誤りを犯した場合、本システムは、類似性に基づく変換を用いることにより、学生の誤った類推がどのようにして起こったのかを再現することができる。この方法については、文献⁸⁾を参照されたい。さらに、手続き3を手続き1と比較することにより、学生の誤りは時間の進み(Ob, R, R1)が欠落しているためであると分かる。しかしながら、なぜ時間の進み(Ob, R, R1)が欠落したら誤りなのか、という情報が全く抽出されない。こうした情報を抽出するためには、理解レベルでの類推を考慮し、その中で学生の誤りを捉えなければならない。さらに、学生の理解レベルの誤りを表現するためには、ドメイン原理の表現について考察しなければならない。

5. ドメイン原理

本システムでは、ドメイン原理を公式を導出するための知識として定義している。ドメイン原理は、領域内の定義を示す知識、式を立てるための知識、解決戦略を示す知識、という三つの知識により構成されている。本システムはこれらの知識を基に前向き推論を実行するが、この実行過程が公式の導出過程となっている。以下では、ドメイン原理の表現と

ドメイン原理による公式の導出過程について述べる。

5.1 ドメイン原理の表現

ここでは、ドメイン原理を構成する、領域内の定義を示す知識、式を立てるための知識、解決戦略を示す知識、についての表現法を示し、それぞれの知識の役割について述べる。

[領域に関する定義を示す知識]

この知識は、物理の領域における概念そのものの定義、および概念間の関係を表現するための知識である。概念の定義にはフレームが用いられており、概念間の関係はルールにより表現されている。図5に光についてのフレームを示す。このフレームにより、光が波の一種であり、属性として速度、振動数、波長を持つことが分かる。この知識は、主に、式を立てるための知識や解決戦略を示す知識の適用可能性を調べるために使われる。また、問題の中で与えられた物体について考えるべき属性もこの知識を用いることにより、抽出することができる。例えば、問題の中で光が与えられた場合に光についての速度、振動数、波長を考慮することがよくあるが、こうした属性の抽出はこの知識を用いることにより可能となる。

[式を立てるための知識]

この知識は、公式を導出する過程において最も重要であり、個々のプリミティブな式を立てるために使われる。図5に示すように、この知識はルールと

```
<領域における定義を示す知識>
frame(light,
  superClass(wave),
  attributes([velocity,frequency,wave-length])).
```

<式を立てるための知識>

```
If
  2点間の距離      l      known,
  2点間に存在する波の数  n      known,
  波長              λ      unknown,
then (Ext. form)
  λ=1/n.
```

<解決戦略を示す知識>

```
If
  動いている物体  ob1,
  動いている物体  ob2,
  相対速度        v      known,
then
  ob1が静止していると仮定する,
  仮定の下で問題を解く,
  仮定を元に戻す.
```

図5 ドメイン原理の表現

して表現されている。こうしたルールは既知の値から未知の値を求めることを仮定して記述されているが、これはこの仮定の下でのルールの適用が学生にとって分かり易いということと、ルール適用の組み合わせの爆発を防ぐという目的による。図5のルールはある距離 l の間に n 個の波が存在する場合、その波の波長は $\lambda = l/n$ で表されることを示している。

[解決戦略を示す知識]

この知識は前述の式を求めるための知識の適用を制御するための知識であり、図5に示すように他のルールの適用戦略を表すメタルールとして表現されている。図のメタルールはは相対速度の問題を解くための戦略を記述したものであり、2つの物体の相対速度が与えられた場合、どちらか一方を静止していると仮定し、その仮定の下で問題を解き、解けたら仮定を元に戻す、という一連の操作が記述されている。

5.2 ドメイン原理による公式の導出

前述の三種類の知識を用いて、音波についてのドップラー効果の公式を導出した結果が図6である。図中の矢印は前向き推論によるルールの適用を表わしており、領域の定義を示す知識は明示されていない。また、解決戦略を示す知識はこの公式を導出する過程では使われていない。

6. 導出過程の変換

本システムは理解レベルでの学生の誤りを捉えることができる。図7に理解レベルの誤りの同定法を示す。この方法における最終的な目的は正しい導出過程（導出過程1）と誤った導出過程（導出過程

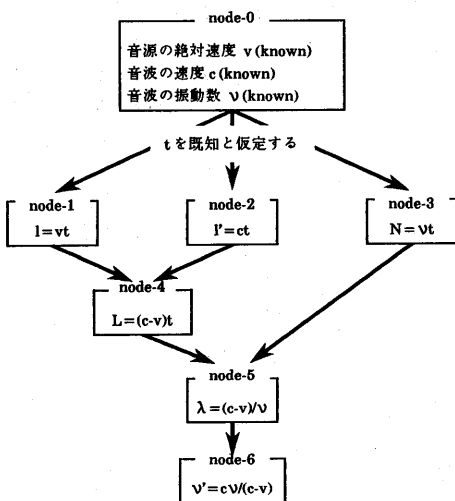


図6 公式の導出過程 (音波の問題)

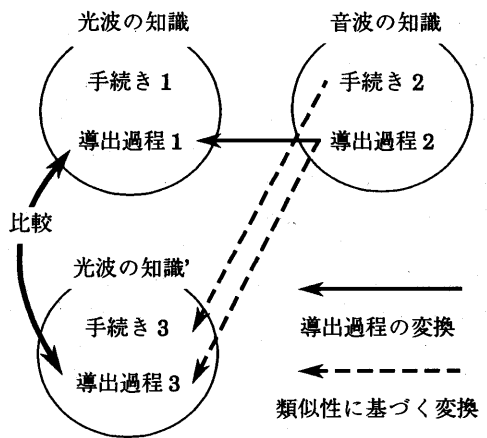


図7 導出過程の変換の概要

3) を比較することである。したがって、どのようにして導出過程1と導出過程3を生成するかが問題となる。これらの導出過程のうち、導出過程3は導出過程2からの類似性に基づく変換を用いて簡単に生成できる。すなわち、手続き2から手続き3を生成する過程で得られた対応関係を基に、導出過程2を変換すればよい。これに対して、導出過程2を導出過程1に変換するためには、深層的な特徴を考慮しなければならない。以下では、こうした変換を実現するための導出過程の変換について述べる。

導出過程の変換は、ベース知識となる導出過程を変換してターゲット知識となる導出過程を生成することにより行なわれる。ここでは、音波についてのドップラー効果の公式の導出過程をベース知識として、この導出過程から光波についての導出過程を生成する方法を示し、導出過程の変換について説明する。音波についての導出過程から光波についての導出過程を類推するための最も簡単な方法は、音波についての導出過程を光波の問題にそのまま適用することである。しかしながら、図6の導出過程を光波の問題に適用すると node-1 の部分で不都合が起きる。これは、音源の速度が絶対速度で与えられているのに対して、光源の速度が観測者に対する相対速度で与えられていることに基づいている。この不都合を解消するためには、観測者が静止しており、光源の速度が絶対速度で与えられていると仮定すればよいが、この仮定は図5のメタルールを適用することにより設定される。このルールは力学等の相対速度の問題を解くためによく用いられる戦略であるが、この場合にも適用可能である。このルールを用いて図7の導出過程を変換した結果が図8であり、この図は図4の手続き1により求められる式を導出する過程を示している。この中で、前述の仮定は node-1 において設定されている。この node-1

により、図6の node-1 から node-6 は図8の node-2 から node-7 のようにそのまま使うことができる。静止した観測者から見た光波の振動数が求められると、次に node-1 で仮定したことを光波の領域での設定に戻すことが必要となるが、これは図8の node-8 の生成の際に行なわれている。ここで、node-1 から node-8 への破線矢印は仮定した設定を問題の設定に戻すことを意味している。node-8 の生成は、静止している観測者についての振動数を動いている観測者についての振動数に書き換えるには、2人の観測者の間の時間の進み具合を考慮する必要があり、そのためには、 v' に $(1-v^2/c^2)^{1/2}$ をかければよい、というルール適用により行なわれている。

学生の誤りの原因を示す情報の抽出は、類似性に基づく変換を用いて生成された導出過程(導出過程3)とドメイン原理上での類推を用いて生成された導出過程(導出過程1)を比較することにより行われる。このうち、導出過程3は導出過程2とはほぼ同じであるから、これらの比較することにより、学生の理解レベルの誤りは、図8の node-1 と node-8 が欠落しているためだと分かる。すなわち、学生が光源の速度が相対速度であることを忘れていること、および node-1 での過程を元に戻していないことが分かる。これらの診断結果は図1でのシステムの説明のためには不可欠である。

7. まとめ

学生が誤りを犯した場合の典型的な教育例について考察し、質の高い説明を生成するための枠組みについて検討した。本システムの特徴をまとめると次のようになる。

1) システム内にドメイン原理を用意することによ

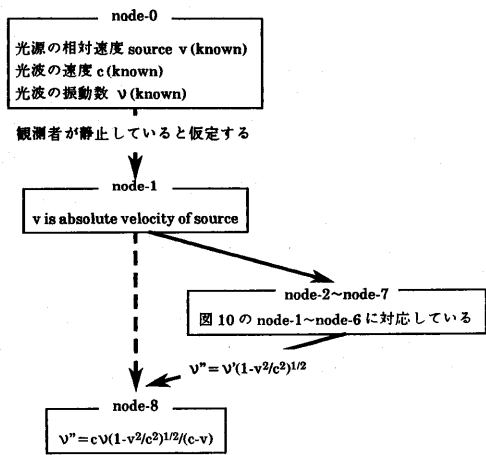


図8 導出過程の変換(実例)

り、原理に基づく説明が可能となった。

- 2) 類推を用いたモデル化機構を実現することにより、学生の理解に応じた説明が可能となった。今後の課題としては、実現を通してシステムの評価をすることが挙げられる。現在、著者らは波動の領域と回路の領域を対象としてドメイン原理の抽出を行っており、これらの知識を使うための前向き推論システムを開発中である。

【参考文献】

- 1) Burstein, M. H.: Concept formation by incremental analogical reasoning and debugging, in Machine Learning II, pp. 351-369, Morgan Kaufmann (1986).
- 2) Carbonell, J. G.: Derivational analogy: A theory of reconstructive problem solving and expertise acquisition, in Machine Learning II, pp. 371-392, Morgan Kaufmann (1986).
- 3) Gentner, D. and Gentner, D. R.: Flowing waters or teeming crowds: Mental models of electricity, in Mental Models, Lawrence Erlbaum Associates (1983).
- 4) 河合他: 論理プログラミングと帰納推論による汎用知的 CAI システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 26, No. 6, pp. 1089-1096 (1985).
- 5) Matz, M.: Toward a Process Model for High School Algebra Errors, in Sleeman, D. et al. (eds.), Intelligent Tutoring Systems, pp. 25-50, Academic Press, London (1982).
- 6) 溝口 他: エキスパートシステムにおける研究動向, 情報処理学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 207-217 (1987).
- 7) 中村 他: 物理問題を対象とした環境型教育システム IPPS の開発, 情報処理学会「教育におけるコンピュータ利用の新しい方法」シンポジウム, pp. 39-48 (1987).
- 8) 中村 他: 類推とドメイン原理を用いた学生モデルの構築手法について, 信学会技術研究会報告, ET-81-1, pp. 73-80 (1988).
- 9) 竹内 他: 振動法による学習者モデルの形成と教授知識について, 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 1, pp. 54-62, (1987).
- 10) 山口 他: 深い知識に基づく知識コンパイラの基本設計, 人工知能学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 77-84 (1987).
- 11) Winston, P. H.: Learning and reasoning by analogy, Commun. ACM, Vol. 23, No. 12, pp. 689-703 (1980).