

学習者の類推過程を支援する I T S の教材知識獲得手法

松原行宏

○前田龍一

小野真道

長町三生

広島大学工学部

あらし 個別教育におけるドリル&プラクティスは、公式などの基本的知識の習得やその運用方法の習得のために重要である。一般的に学習者の問題解決を支援するための手段として、問題の内容に関する説明、解法についてのヒントの提示などが考えられる。しかし学習効率を考えると、それらを明示的に与えるより学習者が既に所有している知識や問題解決の方略を用いて問題の解法を発見させる方が効果的であり、学習者が過去に解いたことのある類似した問題を提示し問題間の関係を説明する方法、つまり類推学習が有効であると考えられる。そこで本稿では学習者の類推による問題解決を支援する I T S における教材知識の構成法を提案し、実際に幾何論証の領域に適用した事例について述べる。

キーワード C A I 知識工学 知識ベース 教材知識獲得法 類推学習支援 幾何論証

A Method of Constructing The Domain Knowledge in ITS
That Supports Analogical Problem Solving

Yukihiro MATSUBARA, Ryuichi MAEDA, Masamichi ONO, and Mitsuo NAGAMACHI

Faculty of Engineering, Hiroshima University

1-4-1, Kagamiyama, Higashi-hiroshima 724, Japan

Abstract In the personal education, the practices is very important for a student to get basic knowledge and to understand how to use them. There are various learning methods to support student. In the case of teaching the novice student, it is efficient that the teacher(system) shows the basic problem at first, after that shows several simillar problems to the basic problem. In this situation, students use the analogy. It shows that analogical problem solving is very usefull for a novice student. In this study, we propose the method of constructing the domain knowledge in ITS that support analogical problem solving for a student.

1. まえがき

近年、コンピュータに教育の機能を持たせたITS (Intelligent Tutoring System) の研究は学習者の個別指導の重要性にともなってその必要性が増大している。個別教育において学習者が練習問題を解くことは、公式などの基本的知識の定着のためや、またその適用方法、問題解決の経験的カンを得得するために重要である。人間の問題解決の方法は、①弱解法と呼ばれるヒューリスティック探索を用いる方法、②領域知識として特定あるいは汎用のプランを用いる方法、③特定のプランはないが過去の類似した問題の解を利用して類推的変換を用いる方法の3つに大きく分けられる¹⁾。①②の方法を用いた問題解決における学習は、従来から多くのITSで取り上げられている^{2,3)}。それらは学習者の問題解決過程の状態を同定し、誤りを診断矯正するものであった。一方③の方法は類推による問題解決(Analogical problem solving)である。

一般に類推とは、いくつかの与えられた対象間の類似性を検出し、その類似性を用いて一方の対象で成立する事実や知識をもう一方の対象に変換することにより、問題解決の手がかりを得たり未知の事実を予測推定する推論方式である。類推による問題解決では、ある状況においては一般的な問題解決よりはるかに効率よく問題解決が達成できる。たとえば教科書や問題集に見られるような、まず例題とその解き方を与え、その後練習問題を与えるという教授形態には類推を用いる学習は有効であり、効果的な学習が可能と思われる。この考え方に基づき、学習者の類推学習を支援するITSの開発が有効であると考えられる⁴⁾。

本稿ではシステム開発の第一段階として教材知識の構築を行う。教材知識は対象領域に大きく依存し明確に分類することが難しい。現在、教材知識の構成は、対象領域の解析やプロトコル解析を繰り返し行うことで構築していくという方法がとられている。これは大変な作業になることが経験的にわかっている⁵⁾。そこで知識抽出は教師が問題を解く過程をシステムに与える中で知識を抽出することを考える。

2. 類推学習支援型ITSにおける教材知識

2.1 類推学習の有効性

人間が新たな概念を理解しようとする場合や、新たな問題解決を行う場合、類推を用いることは有効である。例えば、理科の教科書に見られるように、電気回路における電流電圧の概念を理解させる場合、電流を水の流れにたとえ説明する方法がよく用いられる⁶⁾。また練習問題の前にはその問題群の典型的問題として例題とその解法を与える場合が多い。このように、ある領域に関する初心者、あるいは熟練していない学習者にとって、当面の問題と非常に似通った過去の問題とその解法についての記憶が、問題解決のプロセス上で有効であると思われる。更にいくつかの関連した問題を学習者に提示することはあるタイプの問題解決を行う練習になり、それらの問題に共通する特徴を一般化する機会を与えることになる。つまりその一般化された抽象表現を記憶内に蓄えるこ

とにより、汎用的な問題解決プランを得ることが可能となる。

2.2 類推学習支援型ITS

学習者の類推学習を支援するために、図1に示すシステムを提案する。システムは以下のような手順で教授を行う。まず対象領域の基本的例題の理解に到達している学習者に練習問題を与え、誤った回答を行ったり回答の行き詰まった学習者の未修得知識を推定する。次に学習者が理解していない部分を教授するため、過去に解決経験のある類似した問題の想起を助けるための説明を与え、どうしても想起できない学習者に対しては過去の類題を提示する。そして現在の問題と過去の問題がどのような類似性や対応関係を持つか、また過去の問題をどのように使って新しい問題を解くか、過去の問題からの解の変換プロセス等を教授する。

なお本稿では対象領域として類推学習が有効と思われる幾何図形の論証問題を取り上げる。

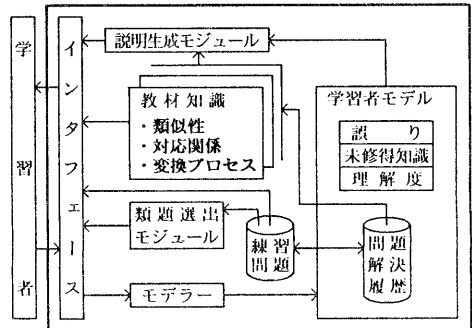
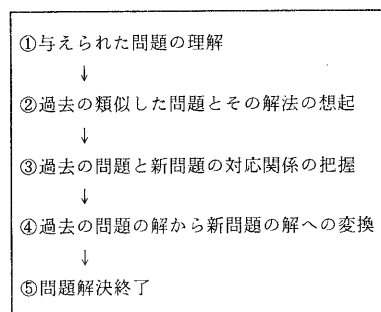


図1. 類推学習支援型ITS

2.3 類推支援における教材知識

学習者の類推を使った問題解決の過程は以下のようなステップで捉えることができる。



本稿では以上のステップにおいて必要となる知識として、与えられた問題と過去の問題の類似性と、その類似性に基づく解の変換プロセスを抽出する。

2.3.1 類似性に関する知識

類似性は、問題を見て内容を理解した段階に発見する問題に関する類似性と、解法を検索していくうちに発見する解法に関する類似性の2つに分類できる。

①問題に関する類似性

幾何論証のような視覚的イメージの影響が強い領域では特に、問題に関する類似性は類推の段階のレベルにより表層的類似性と問題構造の類似性の2つに分類することができる。表層的類似性は問題を視覚的に認知する過程において発見されやすい類似性である。例えば図2のような図形は視覚的認知段階で、三角形の組み合わせ方に明かな類似性を持つ。一方、問題構造の類似性は、問題の視覚的情報だけでなく、仮定などの等性条件を含めた類似性で、例えば図3のような類似性が考えられる。左の図形において条件より $\angle BAD = \angle EAC$ が言える。また右の図形において $\triangle ABC$ 、 $\triangle ADE$ は正三角形なので $\angle BAC = \angle DAE$ が言え、点Aを頂点とする交差した等しい角をもつという類似性を持つ。

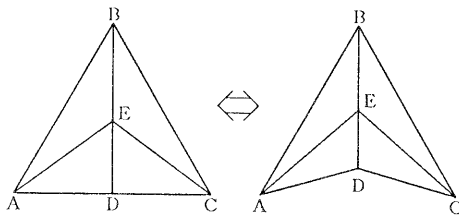


図2 表層的類似性を持つ問題

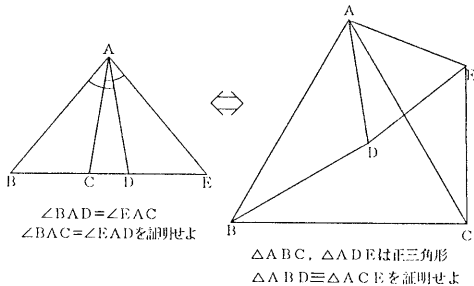


図3 問題構造の類似性を持つ問題

②解法に関する類似性

解法に関する類似性は図4に示す例として捉えることができる。この問題では問題状態には明確な類似性がみられないが、解法過程を比較すると解法状態、特にサブゴールの設定の仕方或使用する知識の類似性が考えられる。つまり図3の左の図形では $\triangle BAE$ と $\triangle BCE$ の合同証明、右の図形では $\triangle QMN$ と $\triangle RPO$ の合同証明という「図形の内部の三角形の合同証明」という同じサブゴールを持ち、使用される定理も同じである。

2. 3. 2 変換プロセスに関する知識

変換プロセスは、過去の問題の解決プランを現在の問題の解に変換する過程である。適当な類推の変換を見つけることは、それ自体問題解決プロセスといえる。この問題解決プロセスでは初期状態と最終状態(目標状態)とで異なる問題空間を保有することになる。このプロセス全体の空間を変換空間と呼ぶなら、変換空間における初期状態は、過去の問題の

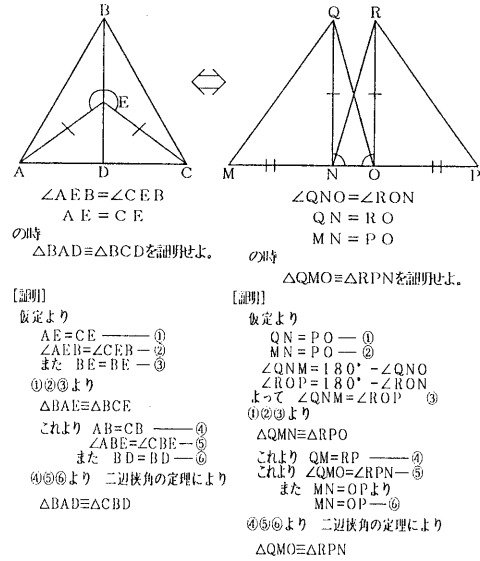


図4 解法の類似性を持つ問題

解であり、目標状態は新しい問題の解である。このように考えると、変換空間におけるオペレータの系列を変換プロセスとして捉えることができる。CarbonellはこのオペレータをTオペレータとよび11種類に分類している^{11, 7)}。

本稿では、Carbonellの研究をふまえて幾何論証によくみられる“パラメータ置換”と“解法の埋め込み”をとりあげる。特にパラメータ置換は、類推による問題解決に不可欠で、日常生活の行動においてもよく用いられる基本的な変換オペレータである。例えばドライバーの代わりにナイフの刃を使うというような機能的な類似性を用いたパラメータの置き換えがそれにあたる。

図4の解法の類似性を持つ問題は左の問題の $\triangle BAE$ と $\triangle BCE$ を右の問題の $\triangle QMN$ と $\triangle RPO$ に対応してパラメータの置換を行い、左の解法の目標部分を右の問題の目標部分に埋め込むことにより類推的問題解決ができる。

3. 教材知識の構成

3. 1 教材知識構築システム

図5に本稿で提案する教材知識構築システムを示す。本システムでは、教師が問題と解法のペアの集合から類似性の高いペアを選択し、システムはその選択されたペアから知識を自動的に抽出する。まず問題構造抽出部において与えられた図形と仮定とにより問題構造ネットワークを構成する。次に類似性抽出部において、2つの問題構造ネットワークの比較を行い類似部を抽出する。また解法構造抽出部において解法構造ネットワークを構成し、2つのネットワークのサブゴールの設定状態或使用された定理などを比較し、類似した解法技法が使用されている部分を抽出する。次に抽出された類似性に基づき解の変換プロセスを抽出する。以上の情報を教材知識空間に組み込む。

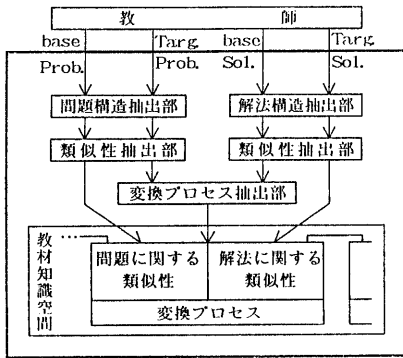


図5. 教材知識構築システム

3. 2 幾何図形と論証過程の表現方法

3. 2. 1 問題の表現方法

本稿ではGreenoの幾何図形表現形式に基づいて図6のような問題構造ネットワークで問題の状態表現を取り扱う⁸⁾。問題構造ネットワークは人間の問題把握の状態を反映したもので、図形レベル、角レベル、線分レベル、点レベルの4つの概念レベルから構成される。図形レベルでは図形を構成する三角形間の関係を表1に示す属性を組み合わせて用いて表現し、その関係を組み合わせにより与えられた図形構造をネットワーク表現する。また各三角形を構成する角、辺、点の情報を角レベル、線分レベル、点レベルにそれぞれ持つ。角レベルでは属性表現を用いて、それぞれの角の関係に関する情報をネットワーク構成している。角を構成する辺の情報、その角の頂点の情報を線分レベル、点レベルに持ち、また辺を構成する端点の情報を点レベルに持つ。更に問題の仮定で与えられた情報を、この問題構造ネットワークに付加する。図形レベルでは、三角形が正三角形、あるいは直角三角形であるといった情報を付加し、角レベル線レベルでは等性条件や平行といった条件を付加する。

表1 図形構造を表現する属性

属性	特徴
INC	一方の三角形がもう一方を包含している状態
CRS	三角形が交差している状態
TCH	三角形が点あるいは線により接している状態
1	辺が共通
2	辺と線分の1つの端点が共通
3	辺と線分が共通
4	線分と線分が共通
5	点が辺上にある
6	点と点が共通
7	共通性なし

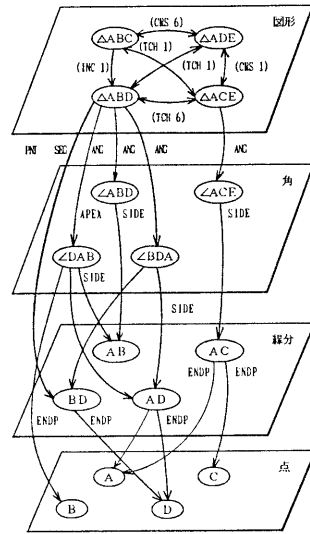


図6 問題構造ネットワーク

3. 2. 2 論証過程の表現方法

また論証過程には論証の根拠となる事実と使われた定理などの知識をノードとした図8に示す解法構造ネットワークを用いる。この解法構造ネットワークは証明しようとする事柄をルートに持ち証明のための中間目標(サブゴール)をノードとした階層的ネットワークである。サブゴールは中間目標や使用される定理また設定された下位のサブゴールの情報を持つ。

3. 3 教材知識の獲得

本稿では教材知識として問題に関する知識、解法に関する知識、変換プロセスの抽出を行う。更にこれらの知識を一つの単位とした知識の構造化を行う。以下、その手法について述べる。

3. 3. 1 問題に関する類似性の抽出

問題に関する類似性は、表層的類似性と問題構造の類似性に分けられる。

①表層的類似性の抽出

表層的類似性は人間が視覚的に捉えることができる類似性であるが、これをどのように捉えるかは個人差が大きく、また類似性を認めても類推による問題解決に有効な類似性であるとは限らない。そこで本稿では、比較的有效性が高い類似性として図形間の包含関係に注目する。つまり三角形レベルの問題構造ネットワークの包含関係に注目して表層的類似性の抽出を行う。

まず図7に示すように、各問題の三角形の包含関係を表現した階層ネットワークを構成する。そして2つのネットワーク間のマッチングを行い類似したネットワーク部分を抽出する。ネットワークのマッチングは、まずネットワークを木に置き換えて表現し、木の兄弟間を入れ換えた全ての組合せを

検索する。これは抽出された類似性を使って解の変換を行う場合、図2の図形のような左右対称な図形では、場合によっては図形を裏返しにみた対応付けを行う必要があるからである。図2の左の問題の(△ABE △ACE)を普通は右の問題の(△ABE △ACE)と対応付けるが、条件によっては右の問題の(△ACE △ABE)というように裏返しに对应付けなければならない場合もある。このようにして木として等しい全ての組合せを抽出し、抽出された部分木の中からネットワークとして等しいものを選ぶ。これにより問題間の全ての可能な三角形の対応関係を抽出することができる。

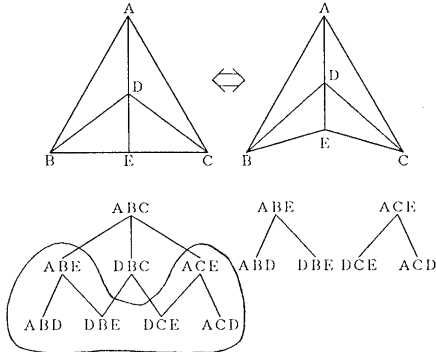


図7 三角形の包含関係による階層ネットワーク

②問題構造の類似性の抽出

問題構造の類似性は、問題に与えられた仮定に基づいて抽出する。各問題の問題構造ネットワークには、図形レベル、角レベル、線分レベルのそれぞれのレベルにおいて各要素間の位置的構造の情報に加えて、仮定で与えられた等号条件、あるいは特殊な構造条件(正三角形や平行といった条件)が付加されている。問題解決に有効な類似性の抽出という意味

で仮定に注目し、問題構造ネットワークの中から仮定で与えられた情報をもち構造的に等しいノードを検索することにより類似性を抽出する。例えば図3の問題では問題構造ネットワークを検索することにより、

TARG:(EQA CRS)ANG-88 ANG-91)

BASE:(EQA CRS)ANG-131 ANG-139)

という類似性が抽出される。これは角が交差していて、なおかつ等しいという類似性を意味している。

3.3.2 解法に関する類似性の抽出

解法に関する類似性は解法過程の戦略的類似性であり、図8の例のように解法構造抽出部において抽出された解法構造ネットワークの比較を行うことにより抽出する。その抽出は解法構造の比較と、サブゴールの状態比較の2つのステップで行う。

まず解法構造の状態の比較は、階層ネットワークのマッチングによりネットワーク構造として等しい解法構造を持つ部分を類似性の候補として抽出する。あるサブゴールが一つ下の階層に複数のサブールを持つ場合、下位のサブゴール全てが満たされる場合、上位のサブゴールが満たされるということだけを意味し、証明過程において下位のサブゴール間の順番は意味を持たない。そこでマッチングは、表層的類似性の抽出時に行ったマッチングと同様に、各階層の下位のサブゴールをすべて入れ換えた組合せ全てに対して行う。これにより類似性の候補を選出する。その後、各候補の中でサブゴールの証明内容、使われている定理を比較することにより、類似しているものを抽出する。

図8は、問題構造に明かな類似性は認められないが、解法構造に強い類似性がある例で、目標の三角形の合同証明のために包含される三角形の証明をするというサブゴールを持っている。

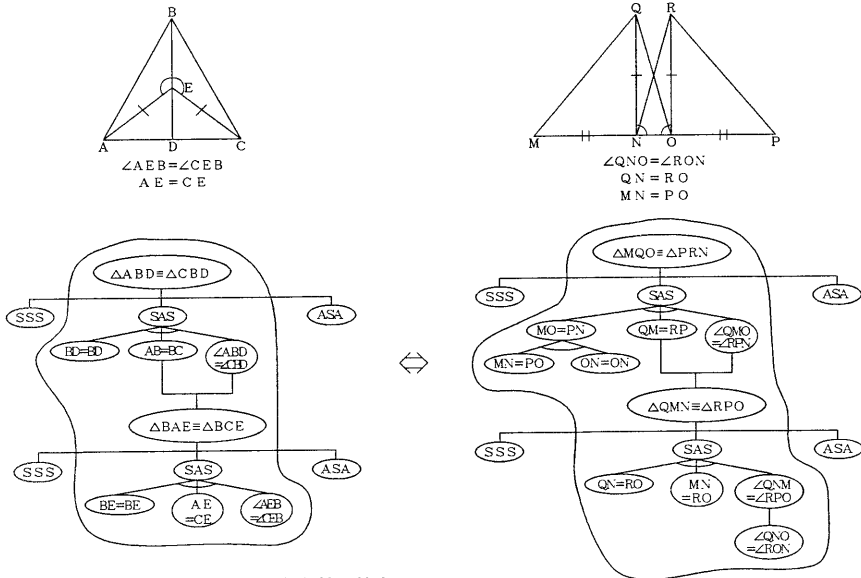


図8 解法構造の類似性の抽出

3.3.3 変換プロセスの抽出

変換プロセスは過去の問題をどのように使って新しい問題を解くかに関する知識である。本稿では幾何論証でよく用いられる変換プロセスとして問題間の図形要素の対応付け、つまりパラメータ置換のプロセスと解法の埋め込みプロセスを抽出する。

類似性抽出部において解法構造の類似性が得られている場合は、その類似性を解法の埋め込み場所とし、得られた部分解のルートどうしを対応付けばよい。次に類似解のサブゴールの内容を調べ、三角形や角の対応を見つけ置き換えてやり、問題構造の類似性がその置換により保たれるなら、その対応付けを抽出する。

解法の類似性が抽出されなかった場合は、問題構造の類似部にみられる情報が使われている解法の部分を各問題の解法構造ネットワークから検索する。それらの解法部に類似性が認められるならその解法部を解法の埋め込み場所とし、更に解法に使われている図形要素の対応付けを抽出する。

図9の問題では類似性抽出部において問題構造の類似性が、

BASE: ((EQA CRS) (∠BAD ∠EAC))
TARG: ((EQA CRS) (∠BAC ∠DAE))

と抽出されている。この類似性が使われている解法部分を検索し解法の埋め込み場所が、

(∠BAC=∠EAD)→(∠BAD=∠CAE)

と抽出される。パラメータ置換プロセスは、この解法部分に使われている図形要素間の対応付けにより、

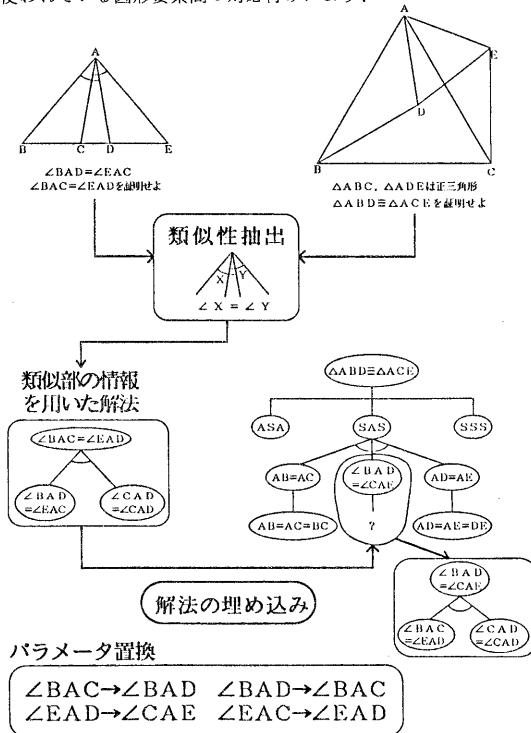


図9 解法の埋め込みの例

∠BAD→∠BAC, ∠EAC→∠EAD

のように抽出される。

3.3.4 教材知識空間の構成

教材知識構造は、図10のように問題空間と教材知識空間の2つの空間で表現できる。抽出された類似性、変換プロセスは1つの知識ユニットを構成している。その知識ユニットは問題空間の各問題にリンクしている。システムは、新しく抽出された知識ユニットの類似性と既に抽出されている教材知識空間内の知識ユニットの類似性とを比較する。そこで等しい類似性を持つ知識ユニットが存在するなら、その知識ユニットどうしをリンクする。この処理により教材知識空間内で知識ユニット間のネットワークを構成し、類似関係による構造化を行う。

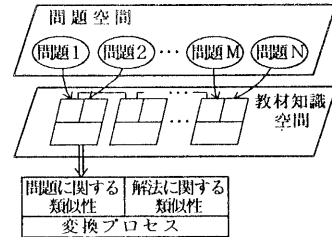


図10 教材知識の構造

4. 適用例

4.1 教授問題

本稿では市販の教科書と問題集の中から、類似性があると思われる問題を16問選びシミュレーションを行った。注目した類似性は、大きく分けて以下の5つに分類される。

- ・正三角形の構造
- ・角の交差構造
- ・角の接合構造
- ・直角三角形の構造
- ・解法の構造

これらの問題の問題構造の入力形式は、図形レベルの構造のみを与え、図形レベルの構造から角レベル、線分レベル、点レベルの構造をシステムが自動的に抽出する。図11に図3の右に示す問題に対する入力例を示す。

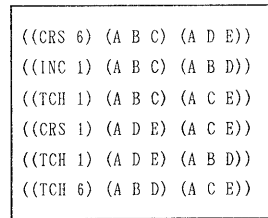


図11 問題構造の入力例

4.2 構成された教材知識空間

構成された教材知識空間を図12に示す。知識は全部で22個抽出された。各知識の番号は、問題空間のターゲット問

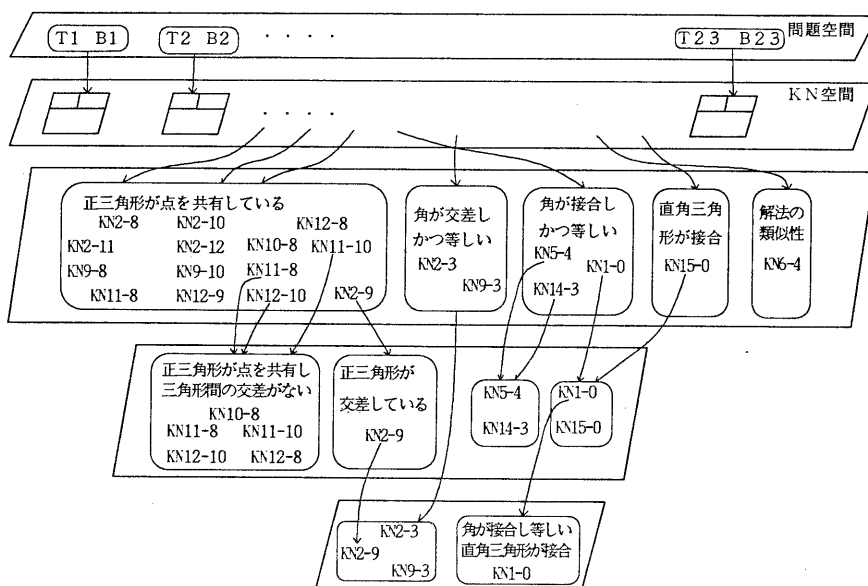


図12 構成された教材知識空間

題とベース問題とのリンク関係を示している。また教材知識空間内で同じ類似性をもつ知識どうしがリンクされている。このリンクにより知識は大きく5つに分類された。以下にその分類を示す。

- ①正三角形が点を共有している状態
- ②角が交差し、かつ等しい状態
- ③角が接合し、かつ等しい状態
- ④直角三角形が接合している状態
- ⑤解法の類似性のみ

これらの知識グループに概念的に包含され、特殊化された類似性をもつ知識グループが更にリンクされている。①の知識グループには三角形の交差状態がないという情報により特殊化された知識グループがリンクされている。また①と②の知識グループの類似性が合接した、正三角形が交差しているという類似性をもつ知識グループが①と②の知識グループにリンクされている。同様に③と④の知識グループの類似性を共にもつ知識グループが③と④の知識グループにリンクされている。これらのグループ内の知識は、各グループにおいて等しい類似性を持っており、グループ内の全ての知識間でリンクされている。

4.3 考察

構成された教材知識空間に関する考察を行い、更に抽出された教材知識の中からKN2-3を例にとりあげ知識ユニット内の問題に関する類似性、解法に関する類似性、変換プロセスに関する考察を行う。

①構成された教材知識空間に関する考察

本稿では教授問題を4.1節に示す5点に注目して与えた。構成された教材知識空間を見ると、知識がこの5つに大きく

分類されていることがわかる。特に市販の問題集においてよくみられる構造として、2つの正三角形が点を共有し一方の三角形をその点を中心に回転させた問題があり、この問題間の知識が類似度の違いにより構造化されて抽出された。例えば問題2と問題8に認められる類似性は、KN2-8で得られているように“正三角形が一点を共有している”としか言えない。しかし問題2と問題9で認められる類似性は、“正三角形が点を共有し、かつ交差している”というようにKN2-9で得られており、KN2-8の類似性と比較して特殊化されたものになっている。そこで教材知識空間においてKN2-8が属する知識グループとKN2-9が属する知識グループをこのように知識を構造化することにより、ITSにおいて教授問題を学習者にどのように与えていくかを決定するのに役立つと思われる。

②知識ユニットに関する考察

問題構造の類似性を持つ問題として前述した図3に示した問題のペアーから抽出された知識KN2-3を例に取り、知識ユニット内の各知識に対する考察を行う。この問題間の表層的類似性は認められにくい、本稿は三角形の包含関係に注目して類似性の抽出を行っており、

((TRIANG-132 (TRIANG-133)) (TRIANG-96 (TRIANG-102)))
 というような類似性が抽出された。これはベース問題の $\triangle ABE$ が $\triangle ABD$ を包含しターゲット問題の $\triangle ABC$ が $\triangle ABD$ を包含しているという類似性である。しかしこの類似性は類推による問題解決に有効な情報ではなく、抽出された類似性を有効の度合により選別するメカニズムが必要であると思われる。問題構造の類似性は、

((EQA CRS) ANG-88 AMG-91)

((EQA CRS) ANG-131 ANG-139))

というように抽出され、これは角が交差しかつ等しいという類似性であり、意図した類似性が抽出されている。解法の類似性は、

((SUBG-162 (SUBG-160 SUBG-161))
(SUBG-113 (SUBG-111 SUBG-112)))
((SUBG-162 (SUBG-160 SUBG-161))
(SUBG-113 (SUBG-112 SUBG-111)))

というように2組抽出されたが、SUBG-111とSUBG-112は共に角が等しいことを証明するためのサブゴールで、2つが意味することは同じである。この解法の類似性により変換プロセスが、

((((SUBG-162 (SUBG-160 SUBG-161))
(SUBG-113 (SUBG-111 SUBG-112)))
(ANG-144 ANG-92) (ANG-149 ANG-95)
(ANG-131 ANG-88) (ANG-139 ANG-91)
(ANG-154 ANG-94))
(((SUBG-162 (SUBG-160 SUBG-161))
(SUBG-113 (SUBG-112 SUBG-111)))
(ANG-144 ANG-92) (ANG-149 ANG-95)
(ANG-131 ANG-94) (ANG-139 ANG-91)
(ANG-154 ANG-88)))

というように2パターン抽出された。これは解法の埋め込み場所としてSUBG-162をSUBG-113に対応付けばよいことを示しており、SUBG-111とSUBG-112の対応付けの違いにより、図形の要素の対応付けつまりパラメータ置換が2通り抽出されている。これはベース問題が対称図形であるために、ベース問題の図形を裏返した図形を用いても対応付けが可能であることに起因する。しかし2つの対応付けは問題構造の類似性を満たした対応付けであるので正しい対応付けであることが確認できる。

なお本システムは、NEWS1460上にKyoto Common Lispを用いてインプリメントした。

5. まとめと今後の課題

本稿では、ITSにおいて学習者の問題解決を支援する方法について考察し、類推による問題解決を取り上げた。類推による問題解決は日常においてもよく用いられ、効率のよい学習形態である。特に対称領域に熟練していない学習者に対し、類推を用いた学習は知識の定着、構造化を促し有効であると考えられる。そこで類推学習を支援するITSの枠組みを提案した。また類推学習支援型ITS構築の第一段階として教材知識を構成することを考え、類推による問題解決の過程を明確にすることにより教材知識の分類を行った。それらは問題に関する類似性、解法に関する類似性、変換プロセスに分類され、幾何論証における各知識がどういったものであるかを述べた。そしてそれらの知識の構成法を提案し、実際に教材知識構築システムをワークステーション上にインプリメントすることにより幾何論証における教材知識の構成を行い、意図した知識が抽出されていることを確認した。

今後の課題として、以下のことが挙げられる。

・三角形間の構造と共有関係を入力することにより問題構造ネットワークを自動的に構成するが、共有関係を持つ図形要素を入力していないため、線分間の重複関係や角の重複関係が抽出できていない。

・三角形が複雑に包含されている問題では、三角形の組合せが増えることにより図形の構造入力に手間がかかる。グラフィックされた図形から図形構造を抽出するインタフェースの開発が必要である。

・本手法では類似性抽出において何の制約も設けていないが、類似度などの尺度を導入することにより、問題解決に有効な類似性のみを抽出する必要がある。一般的に問題を比較するときは、初期状態、経路制約、最終状態の3つの状態をそれぞれ比べる必要がある。幾何論証を対象と考えるとき初期状態は与えられた仮定であり、経路制約は図形構造であり、最終状態は証明すべき事柄と考えられる。本手法では、これらを総合的に比較しており、問題に応じ3つの状態に優先度を付けるなどの新たな比較方法を検討する必要がある。

・本稿で取り上げた変換プロセスは、パラメータ置換と解法の埋め込みのプロセスだけである。しかしCarbonellが分類しているTオペレータは11種類であり、類推による問題解決はこれらの全てのオペレータを用いることにより、さらに複雑な問題の類推による問題解決が可能と思われる。例えば、解法の埋め込みを行った後、一般的な問題解決のオペレータを適用し、再び別の問題の解の埋め込みを行うといったダイナミックな変換が考えられる。

【参考文献】

- 1) Carbonell, J. G.: "Derivational Analogy: A Theory of Reconstructive Problem Solving and Expertise Acquisition", *Machine Learning II*, pp371-392, MorganKaufmann(1986).
- 2) 岡本, 松田: "幾何論証の世界における知的C A Iの構成について", *情処学論*, 89-CE-4, pp71-76(1989).
- 3) Anderson, J. R.: "Acquisition of Proof Skill in Geometry", J. G. Carbonell, R. Michalski and T. Mitchell (eds), *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*(1983).
- 4) 小野, 松原, 長町: "類推学習支援型ITSのための教材知識構成法に関する研究", *信学技報*, ET90-83, pp95-100(1990).
- 5) 畑本, 長町, 伊藤, 辻: "算術演算の知的C A Iに関する一研究", *人間工学*, Vol. 23, No. 4, pp257-265(1987).
- 6) D. Gentner, D. R. Gentner: 水の流れと群れの移動: 電気メンタルモデル, 淵一博監修, *メンタルモデルと知識表現*, pp. 41-74, 共立出版(1986).
- 7) Jaime G. Carbonell: "Learning by Analogy: formulating and Generalizing Plans from Experience", *Machine Learning*, vol. 1(1984).
- 8) Greeno, J. G.: "問題解決の過程", サイエンス社, 東京(1985).