直接操作可能なグラフィック・インタフェースを有する幾何論証知的 CAI システム

岡本 敏雄† 松田 昇† 佐々木 宏†

幾何論証を教授する知的個別指導システム（ITS: *Intelligent Tutoring System*）において，Graphic User Interface（GUI）の技術を用いて，視覚化された幾何図形を直接的に操作するヒューマン・インタフェースが有効であることを示し，具体的なシステムの構築手法について述べる．構築されたシステムは，通常のITSが有する基本的な機能の他に，初等幾何の定理証明を教授するために特に工夫された次のような機能が実装されている．(1) 課題図を表現した幾何図形オブジェクトを直接操作することにより証明作業が行えるヒューマン・インタフェース，(2) 学習者の要求に応じて証明過程を可視化し，説明を提示する機能．本システムの実現により，形式的な証明の記述が学習の妨げになっていた学習者に対して，視覚的，試行錯誤的な学習環境を提供し，論理的思考を促進する証明作業の支援環境を提供することができた．

Intelligent CAI for Geometric Theorem Proving with Dynamic Manipurative Interface

TOSHIO OKAMOTO,† NOBORU MATSUDA† and HIROSHI SASAKI†

This paper describes an effective use of the graphical user interface (GUI) for an intelligent tutoring system (ITS) designed for the geometric theorem proving, which provides a dynamic manipulation environment on visualized geometric objects. The outline of the configuration of the developed ITS is briefly documented as well. In addition to the ordinary equipment inherent in the intelligent tutoring systems, this system has the following additional functions; (i) a dynamic manipulative human interface for the geometric objects which greatly enhance the students to construct the proof processes, (ii) a graphic based presentation facility which demonstrates an explanation of a process of the problem solving by visualizing the entire structure of a proof. The developed ITS provides visual learning environment where students can perform problem solving in the way of trial and error. Through this learning environment students would be able to learn the nature of the geometric theorem proving rather than just the memorization of how to write formal proof statements.

1. まえがき

知的学習支援システムにおいて，操作性の良いヒューマン・インタフェースは，学習者に自然な学習環境を提供するうえで，きわめて重要な要因となる．システムがどれほど知的な振舞いを示しても，学習者にとって唯一コミュニケーションのチャネルであるインタフェースに操作上の負荷を感じるようでは，結局，学習効果に期待が持てるとは考えにくい．ヒューマン・インタフェースの研究は，近年，マルチメディアなどの新技術に後押しされて，活発に行われつつあるが，人間の教育という高次なコミュニケーションが必要とされる教育システムに貢献しうる機構の開発には至っていない．したがって，教育対象であるドメインの特質を考慮したインタフェースの設計が必要とされる．本研究では，初等幾何の論証問題を対象として，幾何論証を教授する知的個別指導システム（ITS: *Intelligent Tutoring System*）の構成について，特にヒューマン・インタフェースを中心に設計・開発することが目的とされている．

幾何論証の問題解決において，学習者が難しさを感じる最も大きな原因のひとつは，証明の記述という形式的・論理的な作業と，試行錯誤的・演繹的な推論作業との間のギャップの大きさにあると考えられる．数学教育学の研究分野においては，古くから，この点を重視した教育方法（教材研究を含む）がさかんに議論されている（たとえば，嶋津[9]，国宗[8]など）．そこで

† 電気通信大学大学院 情報システム学研究科
Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

は，形式的な証明の記述に先立って，図形を直接的に操作した思考が重要であると述べられている．また，作図操作により，問題解決に必要な知識が想起されやすくなり，問題解決が促進されるといった認知的側面からの実験結果も報告されている[5]．

このように，幾何論証の学習を支援する教育システムでは，GUI（*Graphic User Interface*）を用いた視覚的な操作･学習環境が必要とされる．そのようなインタフェースを実装した先駆的なシステムとして，Anderson らの Geomerty Tutor がある[1]．そこでは，証明文の形式的記述を否定し，証明に用いられるプリミティブな記号列をノードに持つようなグラフによって証明過程を視覚化し，さらに操作可能なインタフェースを具備したシステムが開発されている[3]．証明過程は，AND/OR 木（グラフ）の構造により表現されている．学習者は，証明すべき結論から与えられた仮定に向けた後向きな思考（推論），および仮定から結論に向けた前向きな思考を適宜切り替えながら，グラフを完成させることで，証明を行う．しかしながら，そこでの操作の対象は，記号列（たとえば，“$AB = CD$” や “$\angle ABC = \angle DEF$” など）であり，上述したような幾何図形に対する直接的な操作環境は実現されていない．我が国においても，幾何図形の持つ制約（垂直，二等分など）を保存したまま図形を変形させることができるインタフェースを実装した幾何学習システムが開発されており，学習者の図形に対する洞察力，直観力の向上に貢献したと報告されている[11]．そこでは学習者の主体的な学習活動を実現させる工夫がなされているが，システム主導の教授行為は実現されていない．

本稿では，上述した背景をふまえて，直接操作可能な GUI を用いた初等幾何論証の知的教授システムの構成について述べる．幾何論証を教授するために，通常の ITS に求められる機能（個別指導機能，学習者モデリング機能など）に加えて，特に下記の機能が必要であると考え，それらを実装したシステムを構築した．さらに，実際に本システムを用いた学習実験を行ったので，その機能評価について報告する．

- 幾何図形に対する直接操作可能なインタフェース
- 学習者の要求に応じて証明過程を可視化し，説明する機能

Anderson らでも述べられているように，視覚化は抽象的な問題解決過程を具体化するものであり，それによって学習者は前提から結論までの過程の観察を容易にし，あらゆる証明の可能性を探求することができる[2),4]．本システムにおいてもこの点を考慮し，GUI を用いた視覚的な証明の展開を可能とするインタフェースを実装している．幾何論証の学習過程にあてはめれば，視覚化は数式を利用した形式的な記述を困難とする学習者の証明作業支援として有意義であるといえる．

2. システムの構成

前述した目的を達成するために，本システムは，下記のように機能分割されたサブシステムから構成されている．**図 1** に本システムの構成を示す．本システムの基本的な構成は，先行して開発された幾何論証の知的教授システムのそれと基本的に同じ枠組みであるが，前述したインタフェースの実装やドメインの拡張が行われている．具体的には，(1) 直線のみならず，円（円弧）および円周角を含んだ課題を扱えるようになった，(2) 開発マシンの制約により探索空間に制限があるが，今回は，それが広くなっている（すなわち，解決可能な課題が量/質ともに増えている），といった点が大きく改善されている．図 1 では，本論文において新たに改善された部分を網かけによって示した．具体的には，グラフィック・ユーザ・インタフェースおよび作図支援モジュールとそれらに関連した知識ベースである．

- 解法エキスパート
- 学習者モデル診断モジュール
- 対話管理モジュール
- グラフィック・ユーザ・インタフェース
- 作図支援モジュール

当該ドメインに依存した知識ベースとして，下記のものが与えられている．

- 幾何図形を認識するための知識ベース（**Fkb**）
- 論証課題の解法に関する知識ベース（**Pkb**）
- 対話管理のための知識ベース（**Dkb**）

当該ドメインにおいて与えられた課題を表現するために，下記に示す知識表現の構造が与えられている．

- **解法木**：特定の課題の解法過程を表現した AND/OR 木
- **課題図ネット**：各課題の課題図形の構造を表現した意味ネットワーク

解法エキスパートは領域におけるプロダクションシステムである．本システムは，Fkb を用いることにより，初等幾何学の問題を証明することができる．解法エキスパートには課題図形の知識として課題図ネットおよび証明すべき結論と前提条件として仮定の集合が与えられる．課題が与えられると可能なすべての解を

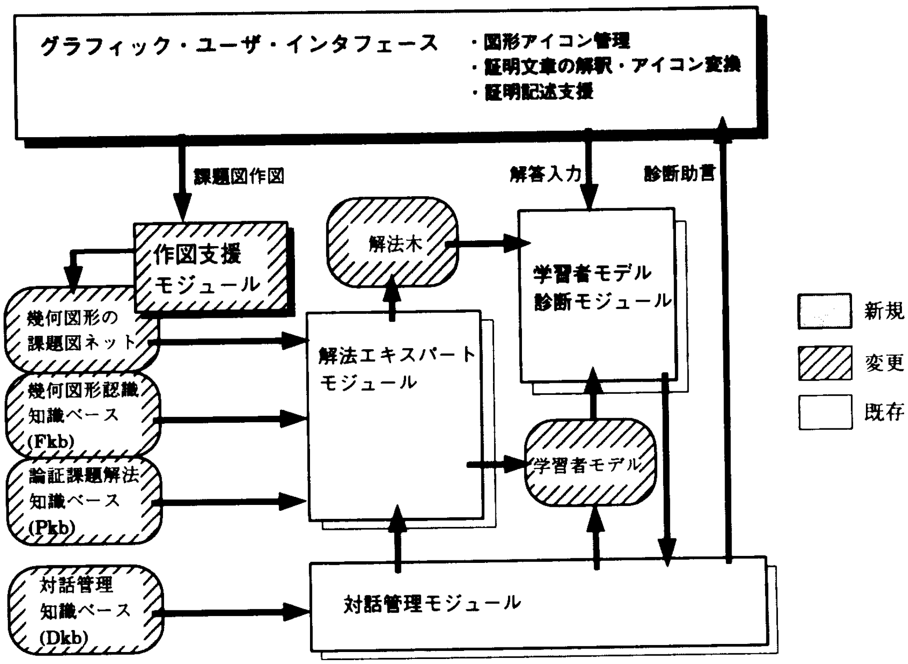


図1 システムの基本構成
Fig. 1 Configuration of the system.

探索し，その解法木を生成する．

学習者モデル診断モジュールは，各問題に対する解法木を用いて学習者の証明過程をトレースすることにより，学習者モデルを生成する．解法木によりトレースすることができない場合，解法エキスパートを用いて学習者の証明計画を認識する．学習者モデルは理解状態を表現するための変数のセットとして実装されている．

対話管理モジュールは学習者モデルの状態に対応した助言を生成し，対話管理を行う．対話文章の生成は文章テンプレートを用いて行う．すなわち，学習者モデルの状態に応じてテンプレート中の変数に適切な値を代入し，現在の状態に即した助言文を生成する．本システムにおける教授戦略は，Dkb の中に組み込まれている．システム主導の教授行為，たとえば，証明過程の説明や学習者の誤り修正のための教授/説明などは，すべて対話管理モジュールによって実現される．

作図支援モジュールは，定理証明課題のオーサリング機能を実現している．これまでに開発されたシステムでは，チュータリング機構およびオーサリング機構は，異なる2つのシステムとして実装されていたが，それをここでは1つのシステムとして統合した．作図支援モジュールの詳細については，松田他[12]で報告されている．

以下，本稿では，それらの拡張された部分を中心に説明する．その他の基本的な部分は，岡本他[6),7)]を参照されたい．

3. GUI による幾何論証の支援

図2に，システムの画面構成を示す．図に示されているように，システムは以下の4つの機能ウィンドウから構成されている．

(1) 課題提示ウィンドウ
(2) 証明記述ウィンドウ
(3) メッセージ・ウィンドウ
(4) メニュー・ウィンドウ

課題提示ウィンドウは，テキストによる課題文ウィンドウとグラフィックによる課題図ウィンドウから構成される．課題文ウィンドウは課題図形の制約や仮定，および証明すべき結論を提示している．課題図ウィンドウには，課題の対象となる図形が提示されている．その際特に，証明すべき結論の対象となるオブジェクト（線分，角など）は，他のオブジェクトと異なる色で表示されており，学習者が証明すべき結論を確認しやすくなるように工夫されている．

証明記述ウィンドウは，課題の解答としての証明を入力するためのウィンドウである．それは，テキストを用いた数式形式による証明文記述用のウィンドウ（証明テキスト・ウィンドウ：*Tpw*）とグラフィック・アイコンを用いた証明構造の視覚化用のウィンドウ（証明アイコン・ウィンドウ：*Ipw*）から構成される．

Tpw では，通常紙の上で証明を記述するのと同様の形式で，数式などを利用して証明文を記述する．証明文は，キーボードから入力するか，もしくは，ウィン

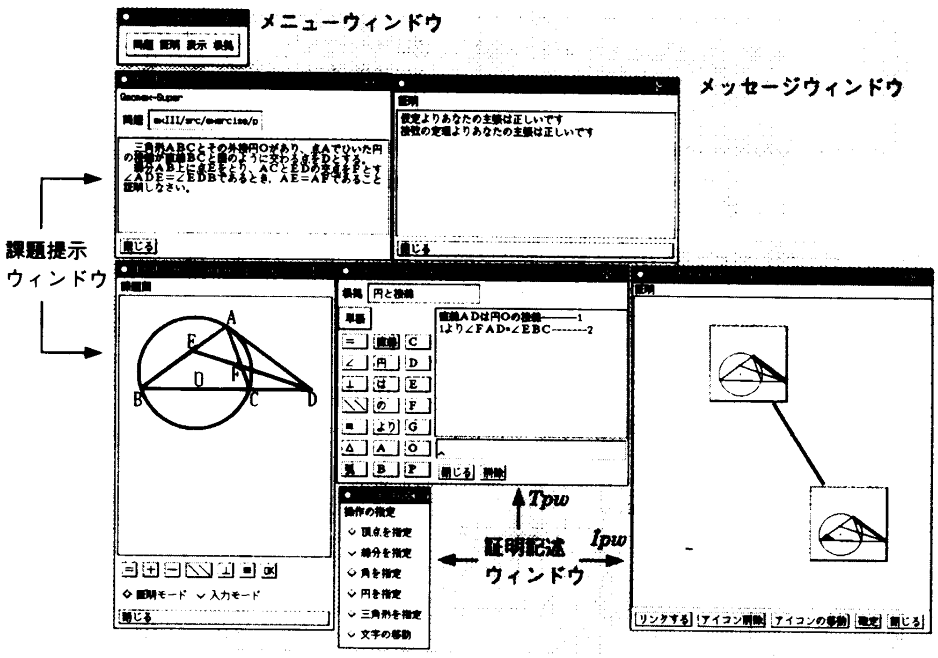


図2　画面構成
Fig. 2　Configuration of the graphic user interface.

表1　証明に利用できるキーワード
Table 1　Set of the keywords which is able to be used for the proof.

カテゴリ	キーワード
幾何図形	垂線，二等分線，中線，接線，弧，直線
記号	＝(等号)，∠（角)，⊥（垂直)，‖（平行) ≡(合同)，△（三角形)
助詞	は，の，より
頂点名	A B C ...（課題図により変化する)

ドウの左に並んでいるキーワード・ボタンを利用することで文字入力を行う（ボタンの選択は，マウスで行う）．学習者の入力した1つ1つの文はウィンドウ上部に順々にリスト表示される．**表1**に利用可能なキーワードの一覧を示す．

*Ipw*は，グラフィック・アイコンを用いた証明の展開を可能にする．すなわち，課題図提示ウィンドウの図形を直接マウスで指示すると，グラフィック・アイコンが生成されると同時に，それと等価な証明文が*Tpw*に提示される．逆に，*Tpw*に証明文が入力されると，内容に該当する幾何学図形を表現したアイコンが生成され，*Ipw*に提示される．さらに，*Ipw*に提示されたアイコンは，“前提”と“帰結”の関係を表すリンクにより接続される．GUIを用いた証明の展開は，本システムで特に重要な機能のひとつであるので，次の章で詳述する．

メッセージ・ウィンドウには，学習者に対するシステムからの助言が表示される．メニュー・ウィンドウは，このウィンドウ以外のウィンドウを開いたり，課題を選択/生成（オーサリング機能）するなど，システムの各種制御を行うためのウィンドウである．システム制御に関するすべての操作は，メニューを選択することにより行う．

4. GUIを用いた証明の入力と提示

前述のように，本システムでは，グラフィックによる視覚的な証明の記述および提示が可能である．学習者は形式的な数式を用いて証明を記述する代わりに，課題図を直接操作することにより，等しい辺や角，合同な図形などのオブジェクトを指示して，証明を展開することができる．

たとえば，“$AB = AC$”と主張したい場合には，課題図ウィンドウに提示された図形の辺 AB と辺 AC をマウスで選択し，次に等号演算子のアイコン（課題図ウィンドウに配置されている）をクリックする．課題図の直接操作により入力可能な関係の一覧を**表2**に示す．マウスによる図形の選択では，オブジェクトの種類に応じてクリックする位置が決められており，選択の曖昧性を排除するように工夫されている．たとえば，線分は両端の点をクリックし，角はそれを挟む2つの線分上の任意の2点と頂点をクリックすることにより選択する．点（頂点，線上の点など）は，その近傍をクリックすることで指定できるように工夫されている．

このようにして，学習者が課題図形のオブジェクトにおける関係を入力すると，課題図の対応する図形が

強調表示されたグラフィック・アイコンが *Ipw*に表示される．たとえば，“$\angle BAF$ と $\angle DCA$ が等しい” という入力操作に対して，課題図の対応する角 $\angle BAF$ と $\angle DCA$ が強調されたグラフィック・アイコンが表示される．さらに，*Tpw*には，生成されたアイコン（すなわち，直接的な操作により入力された主張）に対応する証明文が生成/表示される．逆に，*Tpw*に証明文を入力すると，それに対応したグラフィック・アイコンが *Ipw*に提示される．このように，*Ipw*と *Tpw*は，つねに内容的に等価な状態に保たれている．

本システムの GUI における最も特徴的な機能のひとつに，証明行為の視覚化があげられる．すなわち，*Ipw*に提示されたグラフィック・アイコンを証明の流れに従って配置し，それらを “前提–帰結” の関係を表すリンクにより結合することにより，視覚的に証明を展開することができる．

リンクおよびアイコンの操作（リンクの生成/削除，アイコンの移動）は，*Ipw*の下部に用意されているボタンを用いて行う．リンクにより結合されたアイコンの “前提–帰結” の関係は，対応する証明文に自動的に翻訳されて，*Tpw*に提示される．逆に，*Tpw*に前提–帰結の関係を表す文章が入力されると，*Ipw*における対応するアイコンがリンクで結合される．

*Ipw*を用いた証明の例を**図 3** に示す．図は，“$\angle FAD = \angle CBE$ と $\angle EDB = \angle ADE$ より $\angle BEF = \angle DFA$” という主張を示している．図に示されているように，アイコンを用いた証明では，前提と帰結の関係が木構造により表現される．なお，帰結となっているアイコンでは，その前提で主張されている対象図形（すなわち，前提のアイコンで強調されている図形オブジェクト）がすべて強調されている．ただし，前提になっている図形オブジェクトと帰結のそれとは異なる色で提示されている．これにより，“前提–帰結” の関係を単一のアイコンに見ることができる．

表 2　図形の直接操作により入力可能な証明文
Table 2　Statements for proof which are argued with GUI.

関係	幾何オブジェクト
=(等しい)	辺，角
≡(合同)	三角形
||(平行)	辺

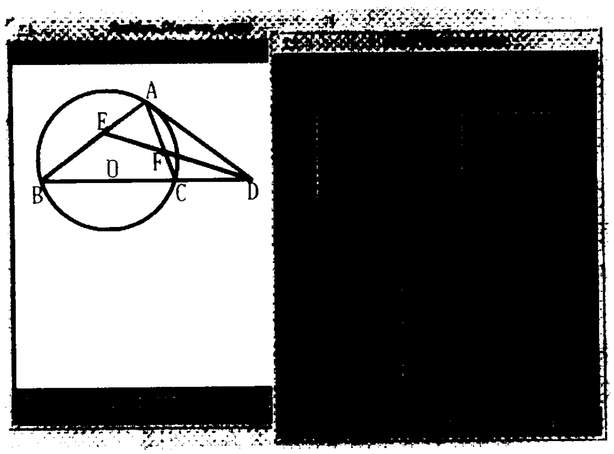


図 3　グラフィック・アイコンによる証明
Fig. 3　Example of the proof with graphic icons.

特定のアイコンを削除した場合（証明中の特定の主張を取り止める行為に相当する）そのアイコンに結合されているすべてのリンクが解除され，*Tpw*における当該の文章も消去される．このようにして，本システムでは，学習者の試行錯誤的な証明作業に動的に追随するようになっている．

5. 幾何論証問題の知識処理

システムに当該ドメインの任意の課題を解決させるために，図形の構造を表現するためのプリミティブを準備し，それに基づく図形構造の認識のための知識および定理証明のための解法知識を記述する必要がある．本章では，システム内部のこうした知識表現を中心に，システムの問題解決モジュールについて説明する．なお，前述したように，本システムの問題解決モジュールは先行して開発されている幾何論証システムのそれの拡張である．以下，拡張された部分を中心に説明する．

5.1 幾何図形の表現

本システムでは頂点，直線，円，半直線，線分，角，弧等のより一般的な幾何学図形を構成する際の要素となる幾何学オブジェクトを図形要素知識と呼び，図形要素知識をノードに持つ意味ネットワークですべての一般的な幾何図形を表現している．図形要素知識それ自体も**表 3** に示すような二項関係を用いた意味ネットで表現されている．**図 4** に，図形要素知識を用いた円周角の表現を示す．一部の幾何図形はその対称性により，図形要素知識によるネットワーク表現では一

表 3　点，直線，円の表現
Table 3　Representation of point, line, and circle.

表 現	意 味
`isa(X,Y)`	対象 X の種類 Y（点，角，線分など）
`label(X,Y)`	頂点 X の記号 Y
`coordx(X,Y)`	頂点 X の X 座標 Y
`coordy(X,Y)`	頂点 X の Y 座標 Y
`center(X,Y)`	円 X の中心 Y
`radius(X,Y)`	円 X の半径 Y
`l_has_point(X,Y)`	直線 X 上の点 Y
`c_has_point(X,Y)`	円 X の円周上の点 Y

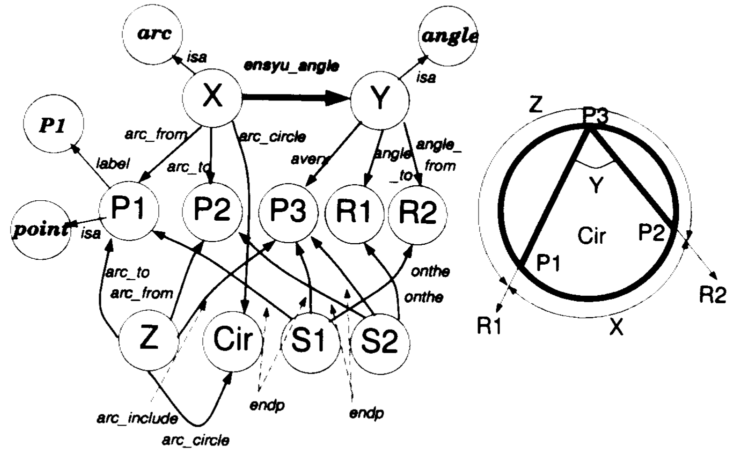


図4 円周角の表現の例
Fig. 4 Example of representation for inscribed circle.

表4 幾何図形認識のための関数
Table 4 Functions for recognizing geometric figures.

表 現	意 味
radius_segment(X,Y)	円 Y の半径 X
suppliment_angle(X,Y)	X と Y は補角の関係
ensyu_angle(X,Y)	弧 X とその円周角 Y

意に記述できないこともある．そこで，ネットワークのリンクに極座標に基づく方位の概念を導入し，曖昧性を解消している．たとえば，図4における角 Y は，2つの線分 R_1 および R_2 から構成されているが，極座標の順序関係からそれぞれを **angle_from** および **angle_to** と区別している．

5.2 幾何図形の認識

ここで幾何図形の認識とは，対頂角，補角，円周角といった幾何学的対象における特徴的な構造を取り出すことを意味する．そのために，**表4** に示すような幾何図形認識のための関数を用いる．各々の図形認識関数は，与えられた図形を表現する意味ネットワークから，特定の構造を持ったネットワークを部分構造として照合する．たとえば，円周角を認識する場合，システムは，与えられた意味ネットワークの中に，図4にマッチする部分構造を探索する．結果として，ノード（頂点）$P1$，$P2$ にはそれぞれ弧 X の始点と終点が代入される．またノード $P3$ は円周角 Y の頂点であり，円 Cir の円周上にあること，および，円 Cir は弧 X を含むことが分かる．さらに，頂点 $P3$ は弧 Z 上の頂点であること，頂点 $P1$ と $P3$，頂点 $P2$ と $P3$ はそれぞれ線分 $S1$ と $S2$ の端点であること，線分 $S1$ と線分 $S2$ は角 Y の辺 $R1$，$R2$ 上の線分であることなども認識される．

5.3 定理証明のための解法知識

本システムの問題解決モジュールは，基本的に上述した意味ネットワークを処理の対象としたプロダクションシステムとして実装されている．したがって，定理証明のための解決知識は，プロダクション・ルールとして表現されている．問題解決器の詳細は，先行文献に述べられているので，ここでの説明は割愛するが，例として，“円と直線との接線によってできる角が円周角と等しい” ことを表現したルールを**図5** に示す．

5.4 解 法 木

解法木は学習者の証明過程を認識するための知識源として利用される．与えられた個々の幾何論証の課題の解法構造を AND/OR 木の構造で表現している．木の各ノードは特定の解法における中間仮説を表し，リンクは目標–副目標の関係を表す．解法エキスパートは，解法知識を用いて与えられた課題を解き，解法木を自動生成する．

6. システムの評価と考察

システムの振舞いを評価するために，中学3年生10名にシステムを利用させた．学習は，1人1台のワークステーションを用いて個別に行われた．

ここでは，以下，質問紙の調査結果，システムの動作（観察者による観察結果）および学習終了後の学習者の感想に基き，GUI を用いた証明の入力形態と提示内容に関してシステムの振舞いを考察する．その他の機能モジュールに関しては，先行して開発されたシステムとおおむね同様な振舞い[6]を実現している．なお，GUI による課題の作成（オーサリング機能）に関しては，松田他[12]で詳述されている．

6.1 質問紙調査によるシステムの評価

システムの評価を行うにあたり，GUI 機構の効果を見るために，上述した10名の学習者に従来の幾何論

$$
\begin{aligned}
&cong(X,Y)\\
&\quad \leftarrow tang(S,C)\\
&\quad \wedge\ onthe\_line(R_2,S) \wedge ray\_endp(R_2,P_1)\\
&\quad \wedge\ c\_has\_point(C,P_1) \wedge triangle\_a(T,1,Y) \wedge triangle\_t(T,1,T_1)\\
&\quad \wedge\ c\_has\_point(C,P_2) \wedge ensyu\_angle(Ar_1,Y) \wedge arc\_circle(Ar_1,Cir)\\
&\quad \wedge\ arc\_from(Ar_1,P_1) \wedge avertex(X,P_1) \wedge onthe(T_1,R_1)\\
&\quad \wedge\ angle\_to(X,R_1) \wedge angle\_from(X,R_2)
\end{aligned}
$$

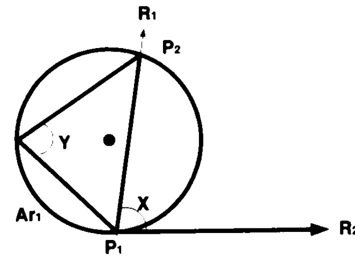


図 5 円周角に関する解法知識

Fig. 5 Rule to solve a problem on inscribed angle.

表 5 システムの評価に関する質問項目

Table 5 A questionnaire for evluation of the system.

1.	**操作性**	(1)	←→	(7)
	操作は簡便で容易でしたか	難しい	←→	容易
	操作は冗長だと思いましたか	冗長	←→	単純
	操作は親しみやすいものでしたか	親しみ難い	←→	親しみやすい
	証明の訂正操作は容易でしたか	しにくい	←→	しやすい
2.	**証明・思考の流れ（イメージ化）**	(1)	←→	(7)
	証明・思考の組み立てはとらえやすかったですか	とらえにくい	←→	とらえやすい
	証明・思考の流れはスムーズでしたか	進まない	←→	はずみがつく
	様々な証明・思考のパターンが考えられましたか	考えられない	←→	考えられる
	絵による証明があれば，言葉（式）による証明は必要ないですか	必要である	←→	必要ない
3.	**証明・思考の外在化と誤りの自己認識**	(1)	←→	(7)
	証明過程を自分の言葉で表現できましたか	できない	←→	できる
	証明過程を他人に説明できると思いましたか	説明できない	←→	説明できる
	証明過程は理解しやすかったですか	理解しにくい	←→	理解しやすい
	証明過程における誤りは見つけやすかったですか	見つけにくい	←→	見つけやすい

証知的 CAI システム（GUI を持たない）[6]による学習を行わせた．課題として，三角形の合同の性質を利用する初等幾何学の定理証明問題を 2 問与えた．

GUI を持たない従来のシステムによる学習を終了した学習者には，次に，本研究で開発した GUI ベースのシステムによる学習を行わせた．その際，事前にシステムの使用方法の説明を行った後，自由に学習を行わせた．システムには，円周角に関する課題が 2 題用意されており，各学習者はそれらをすべて学習した．学習の過程において，観察者は，システムの操作方法のみの助言を与え，課題の解決方法など，教授行為に関わる助言は与えなかった．すなわち，システムの有する教授機構により学習が展開された．

システムを用いた学習の後，各学習者にシステムの機能・振舞いに関する質問紙調査を行った．質問紙は，(1) 操作性，(2) 証明・思考の流れ（イメージ化），(3) 証明・思考の外在化と誤りの自己認識といった観点から，**表 5** に示す質問項目により構成される．

図 6 に質問紙調査の結果を示す．調査の結果，言葉（数式）による証明と比較して，GUI によるそれは，証明過程における思考のイメージ化やその外在化，さらには誤りの自己認識などに有効であることが見いだせる．

6.2 GUI による証明の入力に関する考察

GUI による証明の入力に関しては，その操作性を中心に観察した．入力作業は，大きく分けて次の 2 つに分類される．(1) 課題図の直接操作による証明文の入力（それにより，対応するグラフィック・アイコンが生成される），および，(2) グラフィック・アイコンを用いた証明の組み立て（リンクの生成・削除，アイコンの移動）．(1) に関しては，対象となる図形を指定する場合に，角や円弧など一部の図形では，多くの点をクリックする必要があり，操作の繁雑さが観察された．これは，複雑な課題図で図形を一意に指定するために必要な制約であるが，今後改善を要する課題である．(2) に関しては，必ずしも論理的に証明を組み立てられない学習者において，いわば試行錯誤的な証明が観察された．すなわち，思いつくままにアイコンを生成し，それらをリンク付けて，システムからの反応を得るといった行為が観察されている．これは，本システムのひとつのねらいである「視覚化による抽象的な思考過程の具体化」の実例であると考えられる．

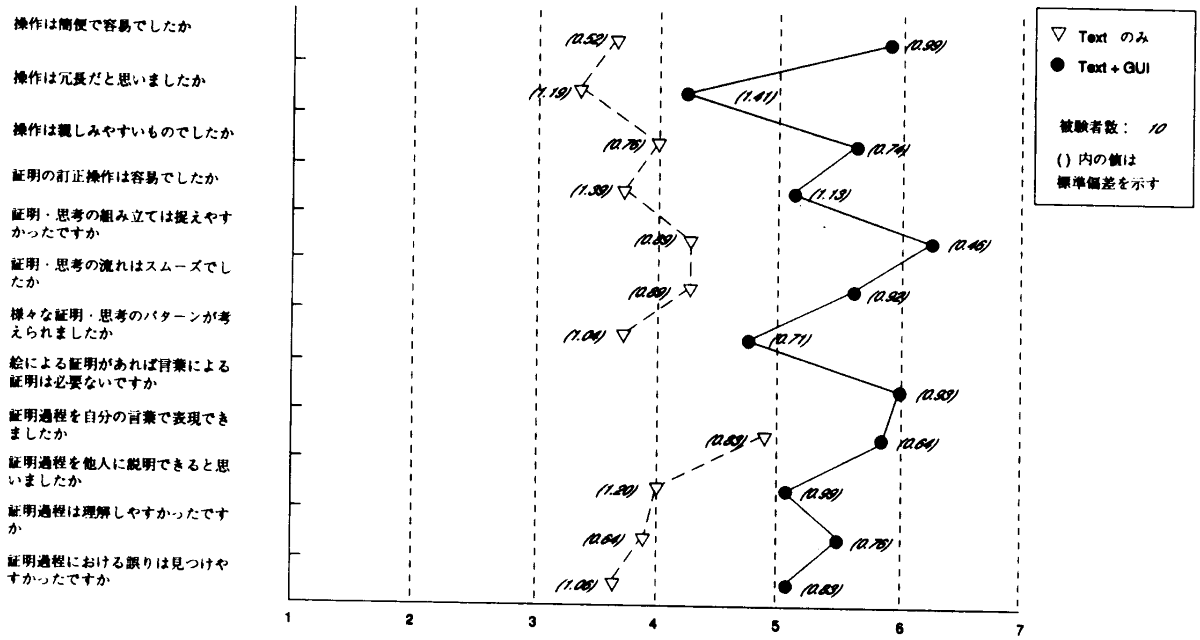


図6　質問紙調査の結果
Fig. 6　Result of questionnaire.

なお，実験の結果，GUI による証明の入力に関して，「課題図を直接操作して，証明文を入力できるので，入力の操作がきわめて容易であり，かつ，入力時のケアレスミスがなくなる」といったメリットが学習者から報告されている．

6.3　GUI による証明の提示に関する考察

GUI による証明の提示に関しては，「証明記述ウィンドウのアイコンによる表示（*Ipw*）は，証明の全体が見えるので，自分のやっていることがよく分かった」という意見が聞かれた．すなわち，GUI により証明の全体的な構成を視覚化することにより，自分自身の証明プランを内省する機会が増えると考えられる．

また，システムが学習者に助言を与える場合に課題図の対応する図形に色を付けるという機能に対しては，「文字だけではなくて，図形で表示されるので，理解しやすかった」という意見が聞かれた．

結果として，GUI による証明の提示は，論理的な思考過程を理解しやすくし，特に難しい課題の場合などに証明の論法（logic）を把握しやすくなるといえる．この点も，システムのねらいである「数式を利用した形式的な記述を困難とする学習者の証明作業支援」に貢献しているといえる．

7.　む す び

幾何論証 ITS の構成について，直接操作可能なグラフィック・インタフェースの機能を中心に述べた．学習者は，初等幾何の定理証明という課題に対して，形式的な証明文章を記述する代わりに，課題図に直接触りながら，辺や角などの幾何図形の等しさや合同等の関係を入力し，証明を展開することができる．本システムの実現により，論理的な証明の組み立てを視覚化することが可能となり，形式的な証明の記述に煩わされることなく証明作業を支援する環境を提供することができた．

本システムの作図機能（オーサリング機能の一部）を用いれば，証明問題の解決過程において，学習者に補助線を引かせることも可能である．しかしながら，教授システムとして学習者の作図した補助線を認識し，教授行動に反映させるためには，補助線の作図行為を学習者の思考過程の一部としてとらえ，学習者モデルに反映させるなどの機構が必要とされる．現時点において，そのような機構の実現は容易ではなく，今後の課題とされる．

本システムは，UNIX ワークステーションを用いて C 言語と Prolog 言語により実装されている．今後，より廉価な計算機環境にシステムを移植し，実際の教育現場などでの活用を通してシステムの機能拡張を行いたい．

参 考 文 献

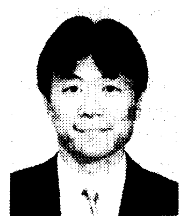
1) Anderson, J.R., Boyle, C.F. and Yost, G.: The Geometry Tutor, *Proc. IJCAI85*, pp.1–7 (1985)
2) Anderson, J.R., Boyle, C.F. and Corbett, A.T.: Congnitive Modeling and Intelligent Tu-

toring, *Artificial Intelligence*, Vol.42, pp.7–49 (1990).
3) Boyle, C.F. and Anderson, J.R.: Aquisition and Automated Instruction of Geometry Proof Skills, *Paper presented at the AERA meetings* (1984).
4) Mandl, H. and Lesgold, A.: *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*, Springer-Verlag, New York (1988).
5) 伊藤毅志, 大西 昇, 杉江 昇:作図するとなぜ解きやすくなるのか, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.7, pp.1501–1505 (1994).
6) 岡本敏雄, 松田 昇:幾何論証の学習世界における知的 CAI の構成について, 情報処理学会論文誌, Vol.29, No.3, pp.311–324 (1988).
7) 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, pp.1046–1057 (1989).
8) 国宗 進:証明の指導に関して思うこと, 教育科学数学教育, No.221, pp.29–36 (1978).
9) 嶋津貴敬:子どもに学ぶ論証指導—操作を取り入れた「重心の定理」の指導—, 教育科学数学教育, No.232, pp.58–65 (1979).
10) 椥場泰孝, 稲葉晶子, 佐々木宏, 岡本敏雄:分散協調型知的グループ学習支援システムの構築, 信学技法, Vol.AI94-67, pp.17–24 (1995).
11) 日高一義:制約図形操作に基づく幾何学習システム, 信学論 A, Vol.J76-A, No.11, pp.1612–1619 (1993).
12) 松田 昇, 岡本敏雄:知的 CAI における幾何学図形入力インタフェースと解法知識ベースの自動生成について, 信学論 D-II, Vol.J73-D-II, No.1, pp.88–99 (1990).

(平成 7 年 9 月 8 日受付)
(平成 8 年 6 月 6 日採録)

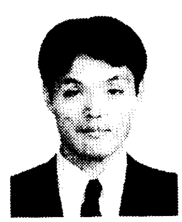
岡本 敏雄(正会員)

1975 年東京学芸大学大学院修了(教育心理学専攻). 工学博士(東工大). 金沢工業大学工学部, 東京学芸大学講師, 助教授, 教授を経て, 1992 年より, 電気通信大学大学院情報システム学研究科教授. 知的 CAI システム, 協調分散グループ作業・学習支援システム, などの研究に従事. (訳書)「人工知能と知的 CAI システム」,「知的 CAI システム」, (著書)「教育における情報科学」など. 電子情報通信学会(情報システム分野論文誌編集委員, 教育工学研究専門委員会委員長), 人工知能学会, 日本教育工学会(理事), 教育システム情報学会(理事)各会員.



松田 昇(正会員)

1962 年生. 1988 年, 東京学芸大学大学院修了(数学教育学専攻). 教育学修士. 金沢工業大学工学部助手を経て, 1993 年, 電気通信大学大学院情報システム学研究科助手, 現在に至る. 主に, 知的教育システムの研究に従事. 人工知能学会, 電子情報通信学会, 日本教育工学会, 教育システム情報学会など会員.



佐々木 宏

1969 年生. 1993 年, 東京学芸大学教育学部情報環境科学課程卒業. 1995 年, 電気通信大学大学院情報システム学研究科修了(情報システム設計学専攻). 工学修士. 知的教授システムの研究・開発に従事. 現在, 富士通(株).