

説明による対象理解支援のための学習環境について

正員 柏原 昭博[†] 非会員 西川 智彦[†]
 正員 平島 宗[†] 正員 豊田 順一[†]

Advanced Learning Environment Based on Intelligent Explanation
 Capability for Object Understanding Support

Akihiro KASHIHARA[†], *Member*, Tomohiko NISHIKAWA[†], *Nonmember*,
 Tsukasa HIRASHIMA[†] and Jun'ichi TOYODA[†], *Members*

あらまし 電気回路などの対象の理解に対する教育的支援では、対象に関する説明が有力な支援手段として用いられている。説明による教育的支援では、一つの対象に関して一般にさまざまに存在する説明を、対象に関する何を理解させるのか、すなわち支援目的に応じて使い分けることが重要である。また、単に説明を与えるだけでなく、学生の理解を誘導したり学生の質問に回答する過程で有効に説明を利用することが支援の高度化に不可欠である。本論文では、電気回路を対象領域として、このような支援の高度化を指向した ITS, LEIEC/I について述べる。筆者らは、電気回路に対する理解誘導・質問応答において回路に関するさまざまな説明を使い分けるために、①視点および対象モデルの概念を用いた対象理解の定式化による支援目的の分類、②支援目的に基づく説明の整理、③整理した説明を計算機上で可能とする説明機能 EXSEL の開発、を行った。本論文では、理解誘導・質問応答における EXSEL の運用による説明の使い分けを中心に論じる。特に、学生の理解誘導において、回路に関するさまざまな説明を使い分けることによって、LEIEC/I が説明による高度な教育的支援を可能にしていることを示す。

キーワード：人工知能，知識工学，知的 CAI，対象理解，説明機能

1. まえがき

従来の ITS 研究の多くは、学生の問題解決過程や誤りを検討することによって、「問題解決過程における助言や誤りの指摘」、「問題解決の繰返し（演習）」による支援の高度化を試みている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。のような支援のほかにも、電気回路などの対象の理解支援では「対象に関する説明」が有力な支援手段として用いられているが、これまで説明による支援の高度化に関して十分な検討が行われていない。本論文では、このような支援の高度化を指向して筆者らが現在開発を進めている ITS, LEIEC/I (Learning Environment based on Intelligent Explanation Capability/I)⁽⁴⁾ について述べる。ここで、対象とは構造、振舞い、機能の三つのレベルで説明できるものを指し、LEIEC/I では電気回路を扱っている。LEIEC/I は、回路に関する定性的な

説明を用いて、回路の定性的な理解を支援するシステムである。

一般に、一つの対象に対する定性的な説明には、さまざまなものが存在する。説明による教育的支援では、支援の過程でこれらのさまざまな説明をいかに取り扱うかが重要な問題となる。一つの対象の理解を支援する場合、その対象に関する何を理解させるのか、すなわち支援目的には複数のものが考えられる。教師は、着目する支援目的に応じて一つの対象に関するさまざまな説明を使い分け、更に着目する支援目的が同じでも学生の理解状態や教育状況に応じて適切に支援に用いる説明を変更することができる。また、単に説明を与えるだけでなく、学生の理解を誘導したり学生からの質問に回答する過程で説明を使い分けることができる。

以上のような説明の使い分けは、説明による教育的支援の高度化を図る上で最も重要な機能の一つであると考えられる。この機能を ITS で実現するためには、(a)対象領域における支援目的の分類、(b)支援目的

[†] 大阪大学産業科学研究所，茨木市
 The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka
 University, Ibaraki-shi, 567 Japan

に基づく説明の整理, (c)整理した説明を計算機上で可能とする説明機能の開発, を行うことが必要となる。これらによって, 支援目的に応じて説明を使い分ける基本的な能力を ITS に与えることができる。更に, (d)説明機能の運用による理解誘導機能および質問応答機能の開発, によって, 理解誘導・質問応答の過程で説明の使い分けを実現することができる。

筆者らは, 以上の手順で LEIEC/I の設計・開発を行っており, 現在までに(a)~(c)を終了している^{(5),(6)}。(a)では, 対象モデルおよび視点の概念を用いて, 電気回路などの構造, 振舞い, 機能の三つのレベルで説明できる対象に対する対象理解を定式化し, 支援目的を分類した。(b)では, どの支援目的に着目しているときにどの説明を用いるのかを整理した。(c)では, 説明機能のモデル, EXSEL (EXplanation Structure model)を開発した。本論文では, このような設計・開発過程を踏まえて(d)を中心に論じる^{(4),(7)}。特に理解誘導機能について詳述する。(d)では, 学生の理解を誘導する方法を整え, 各誘導方法を実行する機構と誘導で必要となる説明を EXSEL の運用から得る機構を構成することによって理解誘導機能を開発した。また, EXSEL によって取扱い可能となる学生の質問を分類し, 質問を認識する機構と応答に必要な説明を EXSEL の運用から得る機構を構成することによって質問応答機能を開発した。各機能では, 学生の理解状態や支援目的を含めた教育状況を考慮しながら EXSEL を運用して説明を使い分けるため, 従来よりも高度な教育的支援が可能となっている。LEIEC/I は, これらの機能によって, システムが主導権をとって学生の理解を誘導したり, 学生が主導権をとって行う質問に回答するといった学習環境を提供している。

2. LEIEC/I の構成

2.1 システムの概要

図 1 に LEIEC/I の構成図を示す。EXSEL は, 電気回路に関して整理した説明の資源となるデータ構造(以後, 説明構造と呼ぶ)を生成する機構のモデルであり, 理解誘導部・質問応答部からの要求に応じて説明構造を生成する。説明構造に必要な知識は, EXSEL 内の知識ベースに与えられている。理解誘導部は, EXSEL を運用して学生の理解誘導に用いる説明を使い分けるモジュールである。質問応答部は, 学生の質問に応じて EXSEL を運用し, 応答のための説明を使い分けるモジュールである。学生モデル部は, 理解誘

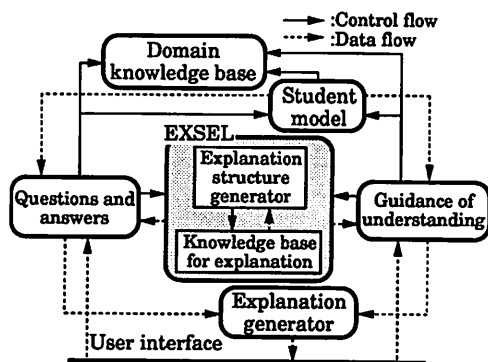


図 1 LEIEC/I のシステム構成
Fig. 1 Configuration of LEIEC/I.

導・質問応答に必要な学生の情報を提供・更新するモジュールである。教材知識ベースは, EXSEL 内の知識ベースとは別に, 教育すべき電気回路に関する知識を記述している。説明生成部は, EXSEL から得られる説明構造から説明を生成するモジュールであり, 現在テンプレートを用いた自然言語文による説明の生成を行っている。以下では, LEIEC/I における支援目的, 説明の整理, EXSEL および各モジュールについて概説する。理解誘導部については, 3. で詳述する。

2.2 支援目的^{(9),(6)}

2.2.1 対象理解の定式化

電気回路などの対象は, 一般に構造, 振舞い, 機能(目的)の三つのレベルでとらえることができる[†]。このような対象を理解することが必要となる状況を与える設計や故障診断などの問題では, これらの異なるレベルを関係づけることが重要となる⁽⁹⁾。例えば, ある機能を果たす電気回路を設計する場合, その機能を具体化するためにトランジスタなどの物理的な道具立てを選んで構造を形成し, 更に構造が正しく機能を果たすかを振舞いによって判断することが行われる。つまり, 構造, 振舞い, 機能の関係を把握することが求められる。また, 三つのレベルの関係付けでは, 構造, 機能から振舞いを導かなければならない場合が多い。これは, 構造, 機能は他のレベルと独立してとらえることができるが, 振舞いは構造, 機能を決めなければとらえることができないためである。LEIEC/I では, 電気

† 本研究では, 電気回路を構成している構成要素とそれらの結合関係により構造を表現し, 構造上における電圧, 電流などの属性のうち入出力となる属性とそれらの因果的關係により振舞いを表現している。また, 入出力属性とそれらの因果的關係に対する目的を表す概念により機能を表現している。

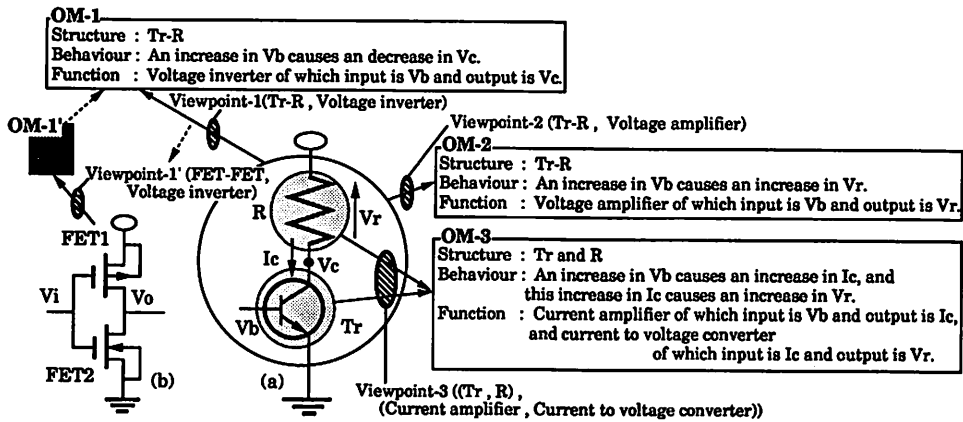


図 2 広義の対象理解と対象モデルの関係
 Fig. 2 Relations between three types of wide object understanding and object models obtained from them.

回路に対する構造，振舞い，機能の 3 項組を対象モデルと呼び，振舞いをとらえるための知識源となる構造，機能の 2 項組を視点と呼んでいる。

LEIEC/I では，以上のような三つのレベルの関係付けが対象を理解する上で重要であるといった観点から，三つのレベルの関係付けを視点から振舞いを取り出すこと，すなわち視点に基づいて対象から対象モデルを生成することであると考え，このような対象モデルの生成を対象理解であると定式化している。

2.2.2 対象理解の分類

一般に，一つの電気回路に対する対象理解は一意に決らない。すなわち，一つの回路はさまざまな視点からとらえることができ，視点が異なるとその回路から得られる対象モデルは異なったものとなる。LEIEC/I では，ある視点を固定して対象モデルを生成することを狭義の対象理解と呼ぶ。また，視点をさまざまに変更し，更にそれぞれの視点から対象モデルを生成することを広義の対象理解と呼ぶ。広義の対象理解におけるある視点からの対象モデルの生成は，狭義の対象理解である。すなわち，広義の対象理解はいくつかの狭義の対象理解を含む。広義の対象理解は，更に視点の変更の仕方により，(W 1)機能の変更による対象理解，(W 2)視点のグレインサイズの変更による対象理解，(W 3)既知の回路による対象理解，の三つに分類できる。

例えば，図 2(a)の電気回路における Tr と R を一まとまりの構造 (Tr-R) としてとらえたまま，異なる機能ごとの各視点 (Viewpoint-1,2) から対象モデル (OM-1, OM-2) を生成することが W 1 である。また，

視点は等価であるが，構造，機能を全体としてとらえたり (Viewpoint-2)，部分的な構造，機能に分解してとらえる (Viewpoint-3) といった詳細度の異なるいくつかの視点から対象モデル (OM-2, OM-3) を生成することが W 2 である。グレインサイズとは，視点を構成する構造，機能の粒の大きさを言う。また，回路 (a) に対する視点 (Viewpoint-1) を，回路 (a) と機能が同一で構造が異なる (これを類似な回路と呼ぶ) 既知の回路 (b) に対する視点 (Viewpoint-1') に変更し，更に変更した視点から得られる対象モデル (OM-1') を対応づけることによって間接的に回路 (a) の対象モデル (OM-1) を生成することが W 3 である。LEIEC/I では，類似な回路のほかに，一般化された回路を既知の回路として扱っている[†]。このような広義の対象理解を行うためには，それに含まれるいくつかの視点の関係やいくつかの対象モデルの関係，および理解すべき電気回路と既知の回路との類似または一般化の関係に関する知識が必要である。

以上のような広義の対象理解を行う能力は，設計などの問題に対処する上で重要なものである⁽⁶⁾。そこで，LEIEC/I では，一つの電気回路に対して三つに分類した広義の対象理解をそれぞれ行うための基本的な能力の向上を支援目的として分類している。

2.2.3 支援対象とする学生のレベル

LEIEC/I では，電気回路に関する電圧などの基本的な概念およびオームの法則などの原理・原則的な知識を既に獲得している学生を想定している。

[†] 一般化された回路とは機能が一般化され，機能の差が構造上の差として明示的に現れる回路である。

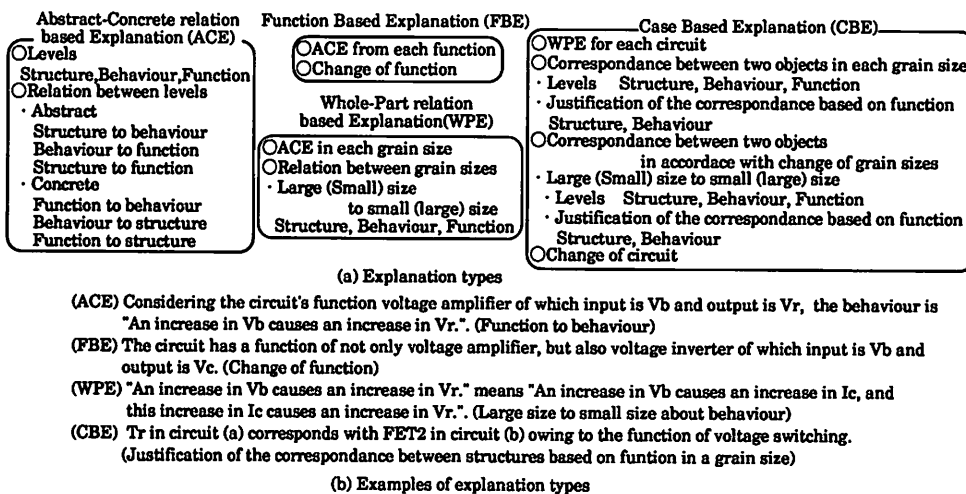


図 3 説明の整理
Fig. 3 Classification of Explanations about an electric circuit.

2.3 説明の整理

狭義の対象理解を支援するためには、視点を構成する構造、機能や視点に基づく振舞いの説明が必要である。また、広義の対象理解の支援には、それに含まれるいくつかの視点や対象モデルの関係および既知の回路との関係の説明が更に必要となる。図 3(a), (b) に、支援目的の分類に基づき一つの電気回路に関して整理した説明、および図 2(a) の回路に対する説明例を示す。大別された 4 種類の説明を説明タイプと呼ぶ。各説明タイプは、それぞれいくつかに分類された説明を含んでいる。ACE は、狭義の対象理解を支援するための説明である。抽象-具体関係 (Abstract-Concrete relation) とは、構造、振舞い、機能の関係であり、構造から機能の方向を回路表現の抽象化[†]、逆方向を具体化と呼ぶ。FBE, WPE, CBE は、それぞれ 2.2.2 での広義の対象理解 W1, W2, W3 を支援するための説明であり、それぞれ ACE を含んでいる。WPE の全体-部分関係 (Whole-Part relation) とは、グレインサイズの異なる構造、機能およびサイズの異なる視点から得られる振舞い間の関係である。

2.4 説明構造モデル EXSEL^{(5),(6)}

EXSEL では、構造フレーム、機能フレームを用いて説明構造を表現している。図 4(a) に図 2(a) の電気回路に対する構造・機能フレームを示す^{††}。構造・機能フレームは、あらかじめ EXSEL 内の知識ベースに用意されている。EXSEL は、理解誘導部・質問応答部から

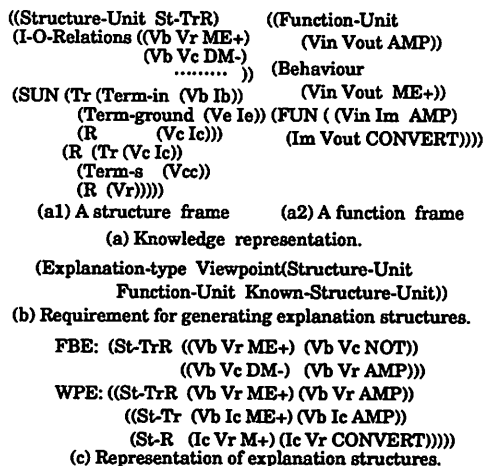


図 4 EXSEL の枠組み
Fig. 4 Representation of knowledge, requirement and explanation structures in EXSEL.

図 4(b) に示すような要求仕様を受け取り、知識ベースを用いてその仕様に記述された視点からの対象理解

[†] ここでの抽象化とは、構造に関する情報が単に除かれるだけではなく、機能に関する情報が付加されることを意味する。つまり、構造では物理的な道具立てが表現されるが、振舞いでは物理的な道具立てのうち入出力属性とそれらの因果関係のみが表現され、機能を達成するために何をやるのかが表現される。機能では、構造のもつ目的が表現される。

^{††} 図 4 中の ME.(M.), DM.- は、入出力属性間因果関係を表す記号である。ME.(M.) は、入力が増加すると出力が 2 次関数 (比例的に増加する関係) を表し、DM.- は、入力がある一定以上 (以下) になると出力がある一定以下 (以上) になる関係を表している。

を支援するために必要な説明タイプごとの説明構造を出力する。説明タイプに含まれるいくつかの説明は、出力される説明構造から得ることができる。

説明構造を記述する基本的な単位（基本構造）は、構造フレームとそれに対応する機能フレームを振舞い（I-O-Relation）によって結び付けたものである。基本構造は、それに含まれる構造単位（Structure-Unit）と機能単位（Function-Unit）が示す構造、機能から得られる対象モデルの生成を支援するときに用いる説明構造を表す。各説明タイプの説明構造は、基本構造の組合せとして表現される。一例として、図4(c)に図2(a)の電気回路に対するFBE, WPEの説明構造を示す。

2.5 教材知識ベース

LEIEC/Iでは、電気回路に対する視点を教材知識として取り出しており、ある回路に対する広義の対象理解の支援をどういった視点の順序で行うのかを決定するためにこの教材知識を用いている。教材知識ベースは、対象フレームを記述単位として表現され、一つの対象フレームは一つの電気回路を表す。図5に図2(a)の電気回路に対する対象フレームを示す。Viewpoint-f, g, kはそれぞれ2.2.2での広義の対象理解W1, W2, W3に必要な視点および既知の回路を表している。

2.6 学生モデル

学生モデルは、対象フレームに対するオーバレイモデルであり、対象フレーム内の各視点に対して、学生による視点の設定可能性（Set Probability: SPと略す）、視点からの対象モデル生成可能性（Generation Probability: GPと略す）、の二つを表している。各可能性に対しては、unknown, true, falseの3値が割り当てられる。unknown, true, falseは、学生による視点の設定および対象モデルの生成について、それぞれ

```
Object name: St-TrR
Viewpoint-f: (St-TrR (Vb Vc NOT))
              (St-TrR (Vb Vr AMP))
Viewpoint-g :
  for (St-TrR (Vb Vc NOT))
    (Tr R) ((Vb Ic SWITCH) (Ic Vc INVERT)))
  for (St-TrR (Vb Vr AMP))
    (Tr R) ((Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT)))
Viewpoint-k :
  for (St-TrR (Vb Vc NOT))
    Analogy: St-FET-R, St-FET-FET General: nil
  for (St-TrR (Vb Vr AMP))
    Analogy: St-FET-R General: nil
```

図5 対象フレームの例
Fig. 5 An object frame.

判断できない状態、可能である状態、可能でない状態を表している。学生モデルの初期値は、対象フレームにおけるすべての視点に対してunknownとなっている。学生モデル部は、理解誘導・質問応答の過程を通して、これらの初期値を更新していく。

また、理解誘導部・質問応答部から参照された視点のSPまたはGPの値がunknownである場合、学生モデル部はその視点の記述に基づき、①視点のグレインサイズに応じて個数を指定して回路の構造を部分的な構造に分けさせる（但し、個数が二つ以上のときのみ質問を行う）、②部分的な構造ごとに入出力属性を与えて機能を答えさせる、といった質問を学生に与えて視点に対する理解状態を診断する。例えば、診断すべき視点が(St-TrR (Vb Vc NOT))である場合には、St-TrRはひとまとまりの構造を表すため①での質問は省略し、学生に対して入出力属性がVb, Vcであることを与えて機能を質問する。

2.7 質問応答部^{(4),(7)}

LEIEC/IではEXSELから得られる説明を用いて学生の質問に回答している。表1に、LEIEC/Iで取扱い可能な質問の型を示す。LEIEC/Iでは、支援に用いる説明が十分に整理されているため、定性推論などによるシミュレーションを基盤とした説明機能によって対象の理解支援を行う従来のシステムよりきめの細かな質問応答を可能にしている。

一般に、質問応答では学生の理解状態などを考慮して適切に学生の質問に回答することが重要である。LEIEC/Iでは、分類した質問の型に対してどの説明で

表1 LEIEC/Iにおいて取扱い可能な質問の分類

質問の型	意味
AC-question	ACEで取り扱える質問
AC-level	構造、振舞い、機能の要求
AC-abstract	レベルに対する抽象化の要求
AC-concrete	レベルに対する具体化の要求
FB-question	FBEで取り扱える質問
FB-others	視点を与える他の機能の要求
WP-question	WPEで取り扱える質問
WP-decomposition	グレインサイズ縮小の要求
WP-aggregation	グレインサイズ拡大の要求
CB-question	CBEで取り扱える質問
CB-analogy	類似な回路の対応関係の要求
CB-generalization	回路の一般化の要求
CB-specification	回路の特殊化の要求
CB-justification	対応関係の正当性の要求

† 説明構造を構成する構造フレーム、機能フレームは、説明構造中のSt-TrRや(Vb Vr AMP)などの構造単位、機能単位をインデックスとして参照される。

応答するのかをあらかじめ整理しており、学生の質問がどの質問の型に対応するのかを適切に認識することによって応答を使い分けしている。質問の認識は、メニュー形式で用意された語句を組み合わせて入力される学生の質問とあらかじめ用意したキーワードとの照合により行っている。このとき、照合に用いられたキーワードと質問の型が必ずしも1対1に対応しないため、教育状況や学生モデルの情報も用いて質問の認識を行っている。教育状況については3.5で述べる。

また、質問応答部は、応答に用いた説明に応じて学生の理解状態の更新を学生モデル部に要求する。すなわち、視点を構成する構造、機能の説明を行った場合は、その視点に対するSPの値をtrueに、かつその視点からの振舞いの説明を行った場合にはGPの値をtrueに更新する。このような更新は、「学生はシステムの与えた説明を理解できた」という仮定に基づいている。

3. 理解誘導

LEIEC/Iは、現在一つの電気回路に対する理解誘導を行う枠組みを提供している。

3.1 理解誘導の枠組み

理解誘導は、図6に示すように三つの処理過程を通して行われる。まず、理解ゴールの設定過程では、教育すべき電気回路に対して三つに分類した広義の対象理解のうち、一つを支援目的（これを理解ゴールと呼び、GOALと略す。図6にはGOAL1~3と広義の対象理解との対応も示している）として設定する。設定された理解ゴールの達成は、その理解ゴールに含まれる狭義の対象理解ごとの、対象モデルの生成誘導を繰り返すこと

返すことによって行われる。誘導プランの生成過程では、学生の理解状態に応じてこのような誘導の繰返しをどのように行うかを計画する。誘導の繰返しの仕方を記述したものを誘導プランと呼ぶ。対象モデルの生成誘導過程では、誘導プランに基づき、学生に対して説明や質問・ヒントを与えて対象モデルの生成誘導を繰り返す。このとき、学生から質問を受けた場合、単に質問応答部を起動して応答するだけではなく、質問に応じた理解誘導を行うといった教育行動を可能にしている。対象モデルの生成誘導過程が終了すると、別の広義の対象理解が理解ゴールとして設定される。

LEIEC/Iでは、2.3で述べたように、設定される理解ゴールに応じて誘導に用いる説明タイプが異なる。また、各説明タイプに含まれるいくつかの説明は、対象モデルの生成誘導過程における学生との対話で使い分けられる。このように、2段階で説明が使い分けられる。以下では、理解誘導の各過程について述べる。

3.2 理解ゴールの設定過程

理解ゴールの設定方法には、(a)GOAL1から一つずつ順に理解ゴールを設定する、(b)学生の質問に応じて動的に理解ゴールを設定する、の二つの方法がある。通常は(a)によって理解ゴールが設定される。(b)については、3.5で述べる。

3.3 誘導プランの生成過程

2.2.2で述べたように、広義の対象理解を行うためには、それに含まれるいくつかの狭義の対象理解の関係や既知の回路との関係についての知識が必要である。そのため、個々の視点から得られる対象モデルを別々に誘導するよりも、各視点から得られる対象モデルを関係づけて誘導することが必要となる。特に、広義の対象理解のうち学生が生成できる対象モデルを用いて、学生が生成できない対象モデルに対する理解誘導を行うことが教育的に有効であると考えられる。このような考え方にに基づき、GOAL1では、教育すべき電気回路の最大のグレインサイズにおける構造に対する複数の対象モデルの生成を誘導する。また、GOAL2では回路のある視点からとらえたときのいくつかのグレインサイズにおける対象モデルの生成を誘導する。GOAL3では、学生が既知の回路に対して理解可能なグレインサイズにおいて、教育すべき回路の対象モデルの生成を誘導する。

誘導プランの生成過程では、①視点の選択、②誘導方法の設定、③説明構造の生成、の三つの処理を通して理解ゴールに応じた誘導プランが生成される。誘導

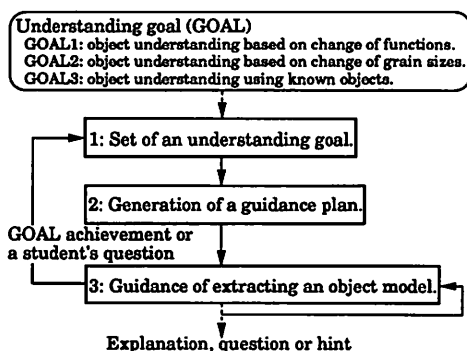


図6 教育戦略の枠組み

Fig.6 Process of guiding a student's object understanding.

プランには、電気回路に対して理解支援すべきいくつかの視点とその設定・変更順序、各視点に対する誘導方法、および誘導に用いられる説明構造が記述されている。視点の設定・変更順序は、基本的に対象フレームに記述されている順となる。

3.3.1 視点の選択

視点の選択では、教育すべき電気回路の対象フレームから理解ゴールに応じて理解支援すべき視点を選択する。このとき、その対象フレームに対応する学生モデルにおいて、対象モデル生成が不可 (GP の値が false) であるような視点を選択する。但し、理解ゴールが GOAL 3 の場合、GP が true である Viewpoint-k の視点を選択する。これは、学生が理解可能な既知の回路を用いなければ GOAL 3 を誘導できないためである。

3.3.2 誘導方法の設定

対象モデルの生成を誘導する方法には、①抽象-具体関係に基づく誘導、②全体-部分関係に基づく誘導、③既知の回路を用いた誘導、の三つがある。

[抽象-具体関係に基づく誘導] 理解ゴールが GOAL 1 のときに用いられる誘導方法であり、電気回路の構造に対して理解支援すべき視点の機能からとらえた場合の対象モデルの生成を、その構造に対して学生が生成可能である別の対象モデルの機能から関係づけて誘導する。この関係付けには、機能の変更の説明が必要となる。更に、理解支援すべき視点から得られる対象モデルの生成を誘導する場合、学生が既知であるレベルから順に各レベルを関係づけることが教育的に有効であると考えられる。そこで、その視点に対する SP の値が true (false) である場合、機能が学生にとって既知 (未知) であるため、機能 (構造) から構造 (機能) の方向へ関係づけて誘導する。この誘導を具体化 (抽象化) による誘導と呼ぶ。ここでの関係付けには、各レベルやレベル間の関係の説明が必要となる。

[全体-部分関係に基づく誘導] 理解ゴールが GOAL 2 のときに用いられる誘導方法であり、理解支援すべき視点のグレインサイズにおける対象モデルの生成を、学生が生成可能なサイズにおける対象モデルから関係づけて誘導する。学生の生成可能なサイズが理解支援すべき視点のサイズより大きい (小さい) 場合、大きい (小さい) サイズから関係づけるといったグレインサイズ縮小 (拡大) による誘導を行う。ここでの関係付けには、サイズが異なる対象モデル間にお

ける視点および振舞いの関係の説明が必要となる。

[既知の回路を用いた誘導] 理解ゴールが GOAL 3 のときに用いられる誘導方法であり、学生が既知である回路に対して対象モデルを生成できるグレインサイズにおいて、教育すべき電気回路の対象モデルの生成を、既知の回路から対応づけて誘導する。ここでの対応付けには、各回路の対象モデル間における視点および振舞いの対応関係の説明が必要となる。

誘導方法の設定処理では、3.3.1 で選択された視点ごとに、視点に対する学生の理解状態に応じて以上の具体的な誘導方法を設定する。このとき、理解ゴールが GOAL 1 の場合教育すべき電気回路の構造に対して学生が生成可能な対象モデルが誘導時の関係付けに必要となる。このために、教育すべき回路に対応する学生モデルから GP の値が true である (または視点の設定・変更順序から true になることが期待できる) 視点の機能 (誘導用機能) を求める。また、GOAL 2 の場合、学生が生成可能なグレインサイズでの対象モデルが必要となる。このために、理解支援すべき視点のグレインサイズに最も隣接し、かつ GP の値が true である (または true になることが期待できる) 視点のサイズ (誘導用視点) を求める。また、GOAL 3 の場合、既知の回路に対して学生が生成可能なグレインサイズでの対象モデルが必要となるため、既知の回路に対応する学生モデルから GP が true である視点のサイズ (対応付け用視点) を求める。誘導プランには、このような誘導用機能・視点、対応付け用視点も記述される。

3.3.3 説明構造の生成

説明構造の生成過程では、3.3.1 で選択されたいくつかの視点から得られる複数の対象モデルの生成誘導に用いる説明を得るために、EXSEL に対する要求仕様を生成し、説明構造の生成を行う。生成される説明構造には、誘導用機能・視点、対応付け用視点を用いた誘導に必要なものも含まれている。

表 2 に、誘導プランに含まれる対象モデルの型と EXSEL に対する要求仕様を示す。生成される要求仕

表 2 誘導プランに含まれる対象モデルと EXSEL に対する要求仕様の関係

理解ゴール	プランに含まれる対象モデル / EXSEL への要求仕様
GOAL1	最大のサイズの構造に対する複数の対象モデル (lbe (SU (FU1 …… FN) nil))
GOAL2	ある視点から捉えた複数のサイズでの対象モデル (wpe (SU FU nil))
GOAL3	対応づけ可能なサイズでの各対象の対象モデル (cbe (SU FU Known-SU))

(注) SU, FU: 最大のグレインサイズでの Structure-Unit, Function-Unit

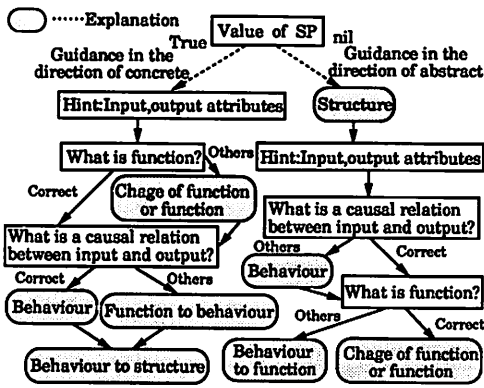


図 7 抽象-具体関係に基づく誘導のための誘導木
Fig.7 Guidance tree for guidance along Abstract-Concrete relation.

様は、理解ゴールによって異なる。

3.4 対象モデルの生成誘導過程

対象モデルの生成誘導過程では、誘導プランにおける視点ごとに設定された誘導方法による誘導を実行する。まず、誘導プラン内の説明構造から視点ごとの対象モデル生成の支援に必要な部分を取り出す。次に、取り出した部分から説明や質問・ヒントを生成し、学生に提示する。このような誘導の実行過程は、誘導木と呼ぶ木構造によって表現される。図 7 に抽象-具体関係に基づく誘導のための誘導木を示す。各誘導方法は、それぞれの誘導木をもつ。誘導は、誘導木の根から葉の方向に行われ、システムからの質問に対する学生の応答に応じて分岐し、各節において説明、質問・ヒントの生成・提示が行われる。LEIEC/I では、誘導木によって 3.3.3 で生成された説明タイプの説明構造から得られるいくつかの説明を使い分けている。

理解誘導部は、対象モデルの生成誘導を終えるたびに、学生モデル部に対して誘導の対象となった視点の SP, GP の値を true に更新するように要求する。LEIEC/I は、教育すべき電気回路に対応する学生モデル内のすべての視点に対して GP の値が true となった時点で、その回路に対する理解誘導を終了する。

3.5 理解誘導における質問処理

学生の質問は、電気回路から得られる対象モデルのどれかに対して行われるものであると考えることができる。質問応答部では、学生の質問に対して認識した質問の型と、LEIEC/I が現在着目している対象モデルに対する視点から、質問がどの対象モデルに対するものかを特定することができる。具体的には、この特定

すべき対象モデルに対する視点（これを学生の視点と呼ぶ）を対象フレームから取り出す処理を行う。例えば、LEIEC/I が図 2(a) の OM-2 に着目しているときに、質問の型がグレインサイズの縮小を要求する WP-decomposition であった場合、図 5 の対象フレームから OM-2 の視点である (St-TrR (Vb Vr AMP)) より一つ小さいグレインサイズでの視点である ((Tr R) (Vb Ic AMP) (Ic Vr CONVERT)) を学生の視点として取り出す。LEIEC/I は、この視点から学生の質問が OM-3 に対するものであると特定する。ここで、LEIEC/I が現在着目している対象モデルについての情報は、現在の電気回路、現在の誘導プランおよび視点、現在の回路に対して LEIEC/I が行った説明(応答)の履歴、といったデータ群と共に教育状況に記述されている。

理解誘導の過程で学生から質問が行われた場合、以上のような方法で学生の視点を特定し、それに応じて質問に対する処理を変更している。つまり、学生の視点に対する GP の値が true である場合は、学生に確認させる意味で質問に対する応答だけを行い、false の場合は以下に示す質問に応じた理解誘導を行う。

学生からの質問は、学生の視点が(1)理解誘導における現在の視点と同一である、(2)現在の視点でなく理解ゴールに含まれる、(3)現在の理解ゴールに含まれない、の三つの場合に分けられる。これらの場合に対してそれぞれ、(1')応答を保留して誘導を続ける、(2')学生の視点に相当する誘導プラン内の視点に対する誘導を実行する、(3')学生の視点が含まれる広義の対象理解を理解ゴールとして設定する、といった処理を行う。但し、(3')では学生の視点だけが誘導プランに設定される。(2'), (3')を行った後は、再び元の理解誘導を続ける。(1')~(3')の処理は、質問応答部が教育状況を参照して学生の質問が(1)~(3)のどの場合に属するかを決めることによって使い分けられる。

3.6 誘導例

図 8(a), (b), (c)に、GOAL 1 のもとで図 2(a) の電気回路に対して行っている誘導例、それに用いられた誘導プラン、および誘導プランの生成に用いられた学生モデルを示す。学生モデルでの視点 f1, f2 に対する SP の値がそれぞれ true, false になっているため、誘導プランでは f1, f2 に対して具体化による誘導、抽象化による誘導が設定されている。また、f2 に対しては下線部に示す誘導用機能が設定されている。

1:シ>入力をVb 出力をVc とすると(a)の機能は何でしょうか?
 2:学>電圧反転
 3:シ>正解です。VbとVcとの因果関係はどうなりますか?
 4:学>Vbがある一定以上になるとVcが一定以下になる
 5:シ>正解です。……..
 6:学>Trの振舞いはどうなりますか?
 7:シ>VbをVcとして電圧反転する機能は二つの部分的な機能からなります。その二つの機能は何でしょうか?
 ……………..
 10:シ>(a)は入力をVb 出力をVr とすると因果関係はどうなりますか?
 11:学>わかりません
 12:シ>Vbが増加するとVrが増加します。機能は何でしょうか?
 13:学>増幅
 14:シ>正解です。このように(a)はVbをVcとして電圧反転する機能以外にVbをVrとして電圧増幅する機能を持ちます。
 (a) A dialogue
 Plan-GOAL1:
 ((St-TrR (Vb Vc NOT) GM1_concrete nil)
 ((St-TrR (Vb Vr AMP) GM1_abstract (Vb Vc NOT)
 (St-TrR (Vb Vr ME+) (Vb Vr AMP) … <1>
 ((Vb Vc DM-) (Vb Vc NOT) … <2>)
 (b) Guidance plan used the dialogue
 Student model for St-TrR
 Viewpoint-f1 ((St-TrR (Vb Vc NOT) (SP=true GP=false)
 f2 ((St-TrR (Vb Vr AMP) (SP=false GP=false)
 (c) A student model.

図 8 学生の理解誘導例

Fig. 8 An example of guiding a student's understanding.

1~5では、説明構造の<2>の部分を用いて、f1に対する誘導が行われている。途中6での学生の質問はWP-decompositionであり、質問応答部で特定される学生の視点はGOAL1に含まれない。そのため、7からその視点に応じた理解ゴールとしてGOAL2を設定して誘導が行われている。10~14では、再びGOAL1のもとで、<1>の部分を用いて、f2に対する誘導が行われている。14では、誘導用機能を用いて学生が生成可能な対象モデルとの関係付けが行われている。

4. 考 察

本章では、説明によって対象の理解支援を行う従来のシステムにおける説明機能について考察する。

STEAMER⁽⁹⁾に代表される従来のITSでは、対象の操作手続きや対象に関する基本的な知識の獲得を支援目的としており、対象を操作するための仮想的な実験環境を提供して学生の操作に対する実験結果をシミュレーションなどによって説明する。しかしながら、提示される説明の種類が単一的に決められており、また学生の理解にとって最も適切であるとシステムが判断して説明を提示できる枠組みを有していない場合が多い。これはシステムが説明を使い分けなくても、良い実験環境を提供すればかなりの教育効果が期待できることを前提としているためである⁽¹⁰⁾。しかし、教育的支援をより高度化するためには、従来のITSでも、

支援目的は異なるが、LEIEC/Iのように支援目的の詳細な分析による説明の整理を通して、説明を使い分ける機能を有することが必要であると考えられる。

5. む す び

本論文では、説明による教育的支援を指向したITS、LEIEC/Iについて述べた。LEIEC/Iでは、EXSELから得られる説明を支援目的に応じて使い分けることにより、電気回路に対する理解誘導・質問応答を行う。特に、EXSELでは回路に関する説明が十分に整理されているため、LEIEC/Iではきめ細かく説明を使い分けることができる。このような説明の使い分けによって、LEIEC/Iは従来よりも高度な教育的支援を可能としている。

LEIEC/Iでは、現在のところ理解誘導を行う上で教育すべきいくつかの電気回路をどのような順序で学生に与えるのかといったコースウェアについては考慮していない。また、LEIEC/Iの提示した説明が学生に与えた効果を検証したり、検証に基づき学生モデルを更新する機構をもたない。このような検証を行うためには、設計や故障診断といった問題を与えて、学生が視点から対象モデルを生成できるかどうかを診断する機構が必要である。今後の課題としては、このようなコースウェアおよび検証機構の開発を含めて、理解誘導部と質問応答部をうまく運用して双方主導的な教育を実現すること、ならびにプログラムなどのほかの領域へLEIEC/Iの枠組みを応用することが挙げられる。

謝辞 本研究を進める上で有益な御助言を頂いた大阪大学産業科学研究所、豊田研究室関係者各位、ならびにITS研究グループ関係者各位に感謝します。

文 献

- (1) Wenger E.: "Artificial Intelligence and Tutoring Systems", Morgan Kaufmann (1987).
- (2) 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", 情処学論, 29, 3, pp. 311-324 (1988).
- (3) 平島 宗, 中村祐一, 池田 潤, 溝口理一郎, 豊田順一: "ITSを指向した認知モデルと教育戦略", 情処「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. 55-64 (1989).
- (4) 柏原昭博, 西川智彦, 桐生健一, 平島 宗, 豊田順一: "説明による教育的支援の高度化に関する検討—対象理解支援システムLEIEC/Iの開発", 信学技報, ET91-18 (1991).
- (5) 柏原昭博, 平島 宗, 中村祐一, 豊田順一: "ITSを指向した説明機能のための対象理解モデル", 信学技報, ET90-8 (1990).
- (6) 柏原昭博, 平島 宗, 中村祐一, 豊田順一: "対象の理解を支援目的とするITSにおける説明機能の高度化に関する"

検討—説明機能のためのモデル：EXSEL の提案—”, 信学論 (D-II), **J74-D-II**, 11, pp. 1583-1595 (1991-11).

- (7) 柏原昭博, 西川智彦, 平島 宗, 豊田順一: “対象理解を支援するための ITS における対話戦略について”, 信学技報, **ET90-89** (1990).
- (8) Rasmussen J.: “Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach To Cognitive engineering”, Elsevier Science (1986).
- (9) Hollan J.D., Hutchins E.L. and Weitzman L.M.: “STEAMER: an interactive, inspectable, simulation-based training system”, *AI Magazine*, **5**, 2, pp.15-27 (1984).
- (10) 大槻説乎, 山本米雄: “知的 CAI のパラダイムと実現環境”, 情報処理, **29**, 11, pp.1255-1265 (1988).

(平成3年6月3日受付, 9月2日再受付)



柏原 昭博

昭62 徳島大・工・情報卒. 平1 同大大学院修士課程了. 現在, 阪大大学院博士課程在学中. 人工知能, 特に ITS の研究に従事. 情報処理学会, 人工知能学会, CAI 学会各会員.



西川 智彦

平1 阪大・工・応物卒. 平3 同大大学院修士課程了. 現在, 関西電力勤務. 人工知能, 特に ITS の研究に従事. 人工知能学会会員.



平島 宗

昭61 阪大・工・応物卒. 平3 同大大学院博士課程了. 現在, 阪大産業科学研究所助手. 工博. 人工知能, 特に ITS の研究に従事. 情報処理学会, 人工知能学会, 教育工学会各会員.



豊田 順一

昭36 阪大・工・通信卒. 昭41 同大大学院博士課程単位取得退学. 同年阪大・基礎工助手. 昭44 助教授. 昭57 阪大産業科学研究所教授. 工博. 現在, ITS, 自然言語理解, 画像処理, および文章画像処理の研究に従事. 日本認知科学会, 情報処理学会,

人工知能学会各会員.