

遠隔学習支援のためのユーザ適応化機能を備えた分散型知識ベース実行方式

藤原 祥 隆[†] 岡田 信 一 郎[†]
高 倉 伸 樹[†] 松 澤 文 太 郎[†]

衛星通信を利用した教師なし遠隔学習支援システムのための分散型知識ベース実行方式を提案する。本方式は、ユーザに対する迅速な応答性とユーザの理解の特性に合わせて学習内容を変える適応化機能の実現を目的とする。この目的を達成するため、知識ベースをアクティブノードと呼ぶ独立動作可能な部分知識の集合とコンテキストグラフと呼ぶ実行制御用のメタ知識により構成する。そしてクライアント計算機上で当該コンテキストグラフを使用した部分知識実行機構によりユーザ応答性の迅速化をはかる。また対象とする知識ベースのアクティブノードのアクション間の関係に着目して生成したコーザルネットワークを用いて各アクティブノードの実行に関する優先度を計算し、これを用いてアクティブノードの実行系列の適応化をはかる方法を提案する。階層型学習支援の実験知識ベースを用いた評価の結果、本方法による適応化は人間エキスパートによる適応化と矛盾のない結果をもたらすことが確認された。

Distributive Knowledge-base Execution System with User Adaptability for Distance Learning System

YOSHITAKA FUJIWARA,[†] SHIN-ICHIRO OKADA,[†]
NOBUKI TAKAKURA[†] and BUNTARO MATSUZAWA[†]

A distributive knowledge base execution system is proposed for the distance learning assistance system with no instructors using satellite communications. The purposes of the system are realizing a self-adaptive function enabling flexible change of the assistance contents according to the characteristics of its user, as well as providing a prompt responsibility to the user. In order to attain these purposes, knowledge base (KB) is organized with a set of independently executable partial KBs, "active nodes" and a meta knowledge for their execution control, "context graph". Then the prompt responsibility is realized by a partial KB execution mechanism using the context graph on the client computer. Moreover, a method for adapting a sequence of active nodes of the target KB is proposed. In this method, priorities for the active nodes of the target KB are calculated using a causal network derived from the relations between actions of the active nodes. It was observed through the evaluation using an experimental KB for a hierarchical learning assistance that the result of the adaptation by this method is consistent with that by a human expert.

1. ま え が き

インターネットや衛星通信を利用した遠隔学習支援(あるいは遠隔教育支援)に関する研究が近年さかに行われており、衛星通信を利用したシステムとしてはSCS¹⁾を使用した遠隔講義システムなどが実用段階にある。著者らは衛星通信を利用した指導者の付かない遠隔学習支援システム(“教師なし”遠隔学習支援

システムと記す)の立場から、衛星通信特有の伝搬遅延時間に起因する応答性劣化の問題を解決する分散型知識ベース実行方式(VEECと略記)を提案した²⁾。一方ユーザとシステムが対話を行うインタラクティブな学習支援システムでは、ユーザの理解の特性に合わせて学習内容を柔軟に変える“ユーザ適応化”の機能がきわめて重要である。VEECはルールベース記述言語OPS83による知識ベース(プロダクションシステム)を基礎としており、適応化のためには起こりうる適応化のケースを事前に洗いだし、知識ベース中にプログラム化する“事前プログラミング”が必要になる。この事前プログラミングは知識ベース設計者の負

[†] 北見工業大学
Kitami Institute of Technology
現在、株式会社ジャパンテクニカルソフトウェア
Presently with Japan Technical Software Co.

担を増加するだけでなく、システム運用中に想定しなかった適応化のケースが起こった場合には適切な対処ができないという結果をもたらす。これはシステムとしては頑健性（ロバスト性）の点で問題である。

この問題を解決するために、本論文では、ユーザの理解の特性（ユーザプロフィールと記す）を評価して事前プログラミングなしに自動的に学習支援内容を変える自動適応化機能を備えた分散型知識ベース実行方式を提案する。本方式は、ユーザプロフィールに合わせた学習支援内容の柔軟な変更を容易とするため、まず知識ベースを、意味のある支援動作を実行する独立動作可能な部分知識（アクティブノードと呼ぶ）の集合とアクティブノード間の実行順序を記述したメタ知識（コンテキストグラフと呼ぶ）とにより構築し、知識ベースの実行をこのコンテキストグラフのみにより制御する方法をとる。そして適応化をユーザプロフィールに合わせた学習内容の柔軟な変更ととらえ、これをアクティブノード実行系列の自動変更として実現する方法を提案する。すなわち本論文は、対象とする知識ベースの支援動作を基に生成したコーザルネットワーク（Causal network: Bayesian network とも呼ばれる^{3),4)}を用いてユーザプロフィールを抽出し、このプロフィールに基づきアクティブノード実行系列を決定するという方法を提案する。

一方ソフトウェアの機能や性能を環境の変化に合わせて柔軟に変更する自動適応化の研究は近年さかんである^{5)~8)}。本論文のようにユーザとのインタラクションを持つシステムにおいて、ユーザのプロフィールを推定し、必要な情報の提供や応答を行うシステムの研究は“学習者モデリング（student modeling）”の問題として位置付けられ、さかんに研究がなされている。この学習者モデリングにおいて数値的アプローチをとる方法に、本論文のような Causal network (CN) を使用する方法のほかに、Dempster-Shafer 法、fuzzy logic を使用する方法がある⁹⁾。

CN による学習者モデリングに関する研究はこれまで種々の報告がなされている^{10)~18)}。これらは知識診断型、プラン認識型、予測推論型のカテゴリに分類されており⁹⁾、OLAE¹⁰⁾、POLA¹¹⁾、Collins らの提案¹³⁾が知識診断型に、Wimp3¹⁴⁾、Huber らの提案¹⁵⁾、Pynadath らの提案¹⁶⁾がプラン認識型に、PRACMA¹⁷⁾、Ppp¹⁸⁾が予測推論型に分類される。またこれらの3つのタイプを兼ね備えたものとして POLA を発展させた ANDES がある¹²⁾。

本論文で提案する適応化法は上記分類によれば知識診断型になる。

一方学習者モデリングにより解決を目指す問題のタイプとしては、物理学の知識レベルの評価（OLAE、POLA、ANDES）、物理学の問題解決の行き詰まりを打開するための支援情報の提供（POLA、ANDES）、教育カリキュラムにおける熟達度評価のためのテストの適応化（Collins らの提案）、自然言語による物語理解（Wimp3）、高速道路におけるトラフィックモニタリング（Pynadath らの提案）、協調動作における他者のプラン認識（Huber らの提案）、中古車購入のための判断情報の提供（PRACMA）、マルチメディアを使用したプレゼンテーションの評価（Ppp）などが報告されている。

本論文の目指す階層型学習支援における「学習支援パスの反復実行動作の適応化」は、学習者の回答結果を評価に使用する点では Collins らの提案と類似している。しかし Collins らの提案がカリキュラム（たとえば代数学）における学習者の熟達度/非熟達度をできるだけ短いテスト系列で効率的に診断することを目的とするのに対して、本論文の適応化は、苦手優先の評価基準により学習支援パスの実行系列を学習者に適応化することにより、効率的に習熟度を向上させることを目的とする。これは Collins らの提案とは異なる新たな問題解決の課題である。

一方 CN をいかに構成するかは解決を目指す問題に依存する。CN の具体的な構成方法として、問題解決のための知識（物理法則や法則適用の規則など）もしくは知識の相互関係や階層関係を AND/OR グラフで表し、それを CN の構造として各ノードに意味を与える方法（OLAE、POLA、ANDES、Collins らの提案）や、対象とする問題の知識を適当な知識記述言語により記述した後、一定の生成規則を用いて CN 構造を生成する方法（Wimp3、PRACMA、Ppp）などが報告されている。また CN の生成を一括して行う方法のほか、学習者に関する手がかりが観測されるたびに、CN を逐次的に構成する方法も提案されている（POLA、ANDES、Wimp3）。

本論文においては、対象とする階層型学習支援モデルの各階層レベルに位置するアクションに、選択の優先順位を与える“優先度”という評価尺度を導入し、これらの優先度を CN により計算するアプローチをとる。すなわち本論文においては、対象とする階層モデルの各アクションに対してリアクションを定義し、これらのリアクション間の因果関係に着目して CN を構成し、各リアクションのあらかじめ定めた状態（値）に対する生起確率を対応するアクションの優先度と対応づける。そしてこの優先度を使用して対象とする階

層型学習支援モデルの各階層において最も望ましいアクションを選択させることにより、学習者にとって最も望ましい学習支援パスを実行させる。さらに1つの学習支援パスを実行した後は、その実行結果を用いてCNの状態を変化させることにより優先度を更新する。そして次にこの変更された優先度に従って最も望ましい学習支援パスを学習者に実行させる。

上記の動作を繰り返すことにより学習者を一定の習熟レベルに到達させるというのが本論文の適応化学習支援の特徴である。

以上述べた本論文の適応化学習支援の目的と方法ならびにそのためのCN構成の考え方は上述の報告^{10)~18)}とは異なる新規なものである。

以下、2章で本論文で前提とする学習支援モデルを示し、3章でアクティブノードとコンテキストグラフよりなる知識ベース構築法とその分散型実行制御方式を述べる。さらに、4章でユーザプロフィールに基づきアクティブノードの時系列を自動的に適応化する方法について述べる。

2. 学習支援モデル

学習支援のタイプとしては、情報処理技術者試験などの受験対策、あるいは大学における演習をともなう授業(たとえばプログラミング演習)などの在宅学習支援を念頭に置く。これらの支援動作の多くは、図1に示すような分岐を持つ階層構造により表現される。図1においてルートノードから葉ノードへ至る特定のパスが意味のある一連の支援動作を定める。たとえば、図1の太線のパスは、レベル1で分野 f_1 の解説、レベル2でトピック t_{12} の解説を行った後、レベル3で演習問題 e_{121} を実行する一連の支援動作を表す。このようなルートノードから葉ノードへ至るパスの選択動作は、学習が完了するあるいはユーザが中止するなどの一定の終了条件が発生するまで一般にパスを変え繰り返される。

以上の状況において、本論文では“適応化”とは、対象としているユーザの理解の特性に対し、ルートノ

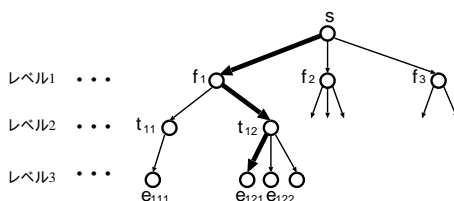


図1 階層構造を持つ学習支援モデル

Fig. 1 Learning assistance model with a hierarchical structure.

ドから葉ノードへ至る最も望ましいパスを自動的に選択することと定義する。そのため4章で述べるように各ノードに実行に関する優先度情報(以後単に優先度と記す)を対応づけ、この値の大小により複数の可能な分岐先から最も望ましいノードを選択する方法をとる。

なお効果的学習の観点から、トピック解説後はそれに関連する演習問題をまとめて実行させることが望ましい場合がある。そのような場合、あるトピックに属する演習問題をひとまとめにしたものを1つの仮想的なノードととらえれば、上述のパス選択の考え方をそのまま適用することができる。

3. 分散型知識ベース実行方式

3.1節で適応化機能の容易な実現を考慮した知識ベース構築法を述べ、3.2節でその分散型実行機構について述べる。3.3節では衛星通信ネットワークを用いた本方式の性能評価例を述べる。

3.1 アクティブノードとコンテキストグラフによる知識ベース構築法

本構築法は知識ベース(以後KBと略記する)をユーザに対する支援動作の実体を記述する部分と、これらの支援動作間の順序を決める制御情報を記述する部分に分離することを特徴とする¹⁹⁾。すなわちユーザに対する支援動作の全体を、意味のある支援動作を行う単位(アクティブノードと記す)の集合として表す。アクティブノードはテキスト、画像、音声などのデータと、これらのデータを使用して意味ある学習支援動作を行うプロシジャ(プログラム)よりなり、独立動作可能な部分知識として実現する。図2にアクティブノードの構成を示す。一方アクティブノード間の実行順序の関係を有向グラフにより表し、このグラフをコンテキストグラフと記す。図3にコンテキストグラフの構成を示す。図3においてグラフの各ノードはアクティブノードに対応し、エッジ(有向枝)は実行の順序関係を示す。図3のノードとして2つのタイプを考える。1つは次の候補ノード群よりただ1つを選ぶ

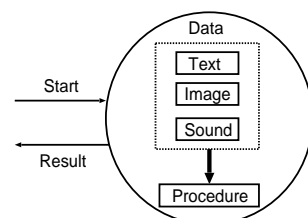


図2 アクティブノードの構成

Fig. 2 Structure of an “active node”.

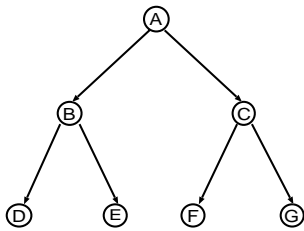


図3 コンテキストグラフの構成
Fig. 3 Structure of a "context graph".

OR ノード，他の 1 つは次の候補ノード群を順にすべて選択する AND ノードである．たとえばあるトピックに関する複数の演習問題をすべて実行する場合は，このトピックを表すノードは AND ノードとなる．

3.2 分散型実行方式の構成と動作

3.1 節の方法により構築された KB の実行方法について述べる．基本的な考え方は VEEC において導入した“先取り機構付き動的実行機構”の考え方を踏襲する．図 4 はこの考えかたによる分散型実行方式のシステム構成を示す．図 4 においてアクティブノードとコンテキストグラフより構成された KB はサーバ計算機（単にサーバと記す）に置かれる．KB はクライアント計算機（単にクライアントと記す）上で実行されるのでサーバは一種のデータ倉庫である．クライアント上の実行機構の中核部は図 4 のコントローラ（Controller）である．これは従来のプロダクションシステムの推論エンジンに相当する．また近い将来の実行に備えて先取りしたアクティブノードを保持するキャッシュディスク（Cache disk）を置く．図 4 の例を用いて実行機構の動作を述べる．図 4 中の矢印に付された番号は以下の説明の番号に対応している．

(1) コントローラはコンテキストグラフより次に実行すべきアクティブノードとして B を選ぶものとする．コントローラに起動されたノード B はユーザに対するデータの提示あるいはユーザからのデータの入力など，あらかじめ定められた動作を行う．(2) ノード B を起動した後，コントローラはコンテキストグラフにより次に実行すべきアクティブノード候補を同定する（この場合はノード D, E）．そしてキャッシュメモリコントローラ（CMC）に対しメモリ上にこれらのノードを“インスタンス化”するように指示する．ここでインスタンス化とは，対象とするアクティブノードを実行可能な待機状態にすることを意味する．(2-1) もし候補ノードがキャッシュディスク上に存在しないときは，CMC はキャッシュディスクコントローラ（CDC）に対しサーバからそれらを取り出すことを要求する．(2-2) CDC は衛星

通信回線を介してサーバから必要なデータを取り出しキャッシュディスクに格納する．(3) CDC のデータ取り出し動作が完了した後，CMC はコントローラによる次の選択動作に備え，候補ノード D, E をメモリ上にインスタンス化し，(4) 一方現在実行中のアクティブノード B はユーザにより指定されたキー情報（key）をワーキングメモリ（WM）に格納する．このキー情報は次に実行すべきアクティブノードを決めるためにコントローラにより使用される．キー情報は，たとえば，ユーザに次に実行可能な学習支援動作群（アクティブノード群）のメニューを示し，ユーザに特定の支援動作を指定させることにより生成する．(5) コントローラは WM からキー情報を読みとることにより次に選択すべきアクティブノードを知る（たとえばノード D）．(6) コントローラはインスタンス化されたノード中より指定のノード（ノード D）を選び起動する．

上記 (2) で述べたように，現在実行中のアクティブノードの動作と次に実行される可能性のあるアクティブノードの先取り転送動作がオーバーラップするため，システムの応答時間中この先取りに要する時間の寄与分を見かけ上削減することができる．本論文では，応答時間を現在実行中のアクティブノードの終了時点から次に実行されるアクティブノードの開始時点までの時間と定義する．

ここで適応化動作は，たとえば上記の (4) におけるキー情報生成を目的とするメニューの提示の際に，各項目に対応する優先度をあわせて表示し，ユーザに項目選択の手がかりを与えることにより実現できる．この場合，システムがユーザからの入力によらずに優先度のみに基づき次のアクティブノードを自動的に選択するように実現することも可能である．なおユーザ主導で学習内容を選択させる場合には，このような優先度に関する機能を作動させなければよい．

3.3 性能評価例

3.2 節で述べた分散型知識ベース実行方式のプロトタイプを Java 言語を用いて作成し，2 種類の衛星通信ネットワーク（対称型ネットワークと非対称型ネットワーク）を用いて性能評価を行った²⁰⁾．対称型ネットワーク（対称網と略記する）は，サーバからクライアントへの下り方向転送と，クライアントからサーバへの上り方向転送の両方に衛星回線を使用し，非対称型ネットワーク（非対称網と略記）は下り方向転送にのみ衛星回線を使用し，上り方向転送には地上回線を使用する．対称網では TCP/IP プロトコルを使用し，非対称網では下り方向は自作のプロトコル（Geo Satellite

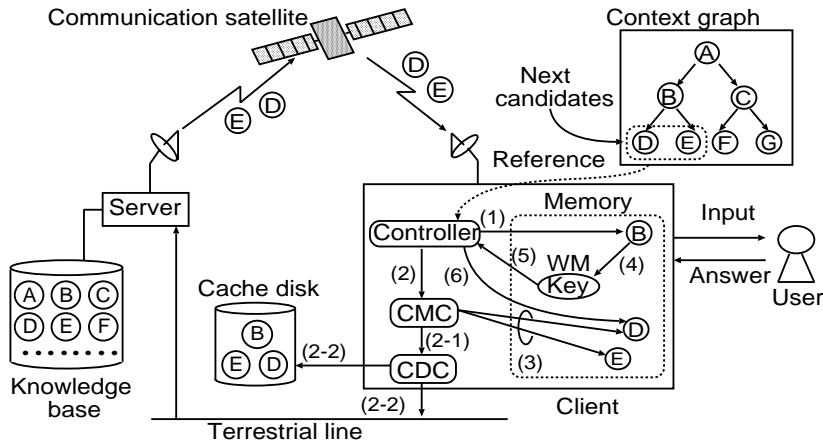


図4 分散型知識ベース実行方式の構成

Fig. 4 Organization of the distributive execution control of the knowledge base.

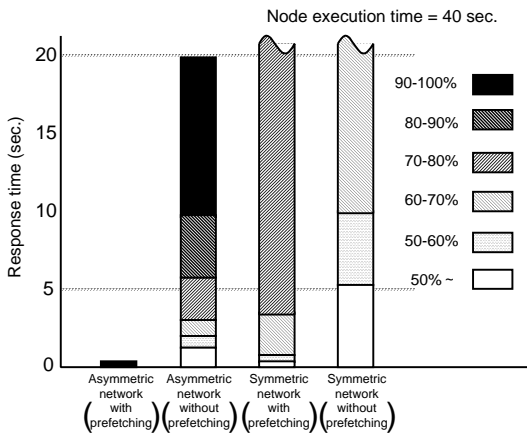


図5 応答時間の累積分布の例

Fig. 5 An example of cumulative distribution of the response time.

Transmission Protocol(GTP)と呼ぶ)を、上り方向にはTCP/IPを用いた。このGTPはTCP/IP/PPP (point-to-point)の機能をそっくり置き換え簡単化したもので、直接衛星ネットワークのドライバを操作するプロトコルである²¹⁾。転送動作はUDPと同様の応答確認のない動作を基本とし、転送したパケットにエラーが検出されたときのみ再送動作を行うものである。また性能評価実験にはJSAT(株)のJCSAT衛星を使用し、性能評価の尺度としてユーザに対するシステムの応答時間を選んだ。実験に際しては、2種類のネットワークのそれぞれについて、アクティブノードの実行時間、先取り機構の動作のありなしを可変パラメータとして応答時間を測定した。なおアクティブノードの実行時間においてはユーザの思考時間が支配要因であるため思考時間を意図的に調整することによりアク

表1 主要パラメータの値

Table 1 Values of the main parameters.

Transfer rate of the symmetric network	57 kbps
Transfer rate of the asymmetric network	258 kbps
Cache disk size	30 files
Average size of the knowledge base	130 kbyte
Node execution time	40 sec

ティブノード実行時間を変化させた。実験用KBには、第一種情報処理技術者試験対策用の学習支援システムの部分集合を作成し使用した。このKBのコンテキストグラフは図1に示したものと同一4レベルの木構造である。実験は図1のルートノードから葉ノードへ至るパスをランダムに繰り返し選び実行し、応答時間を測定した。異なるタイプの分散型システムに対して得られた応答時間の累積分布を図5に示す。応答時間の累積分布は、測定結果を昇順にソートし、最初の50%に属する部分を示した後、10%きざみに、残りの部分を表示したものである。これらの結果から先取り機構の使用により応答時間が顕著に減少することがみられ、本方式は衛星通信ネットワークの応答性向上に対して有効であることが確認できた。表1に実験に用いた主要パラメータの値を示す。

なお図5でアクティブノード実行時間が40秒の例を選んだのは、この値の近傍で、システム応答時間に関する「非対称網と対称網の違い」および「先取り転送があるときとないときの違い」を1つの図で了解性良く表現できるためである。

4. コーザルネットワークを利用した適応化法

4.1 適応化法の基本的な考え方

前述のように本論文の適応化はシステムとユーザとのインタラクションの結果からユーザプロフィールを抽出し、これに基づき実時間的に学習支援動作を変えることを目的とする。

ユーザプロフィールは学習支援アクションに対するユーザのリアクションから得ることができる。たとえば図 1 の例において、あるトピックについて解説をし、続いてこのトピックに関する演習問題を実行するという一連の支援アクションを行ったとする。もし出題した問題に対して不正解というユーザのリアクションがあったとき、ユーザはこのトピックを理解していないという“ユーザプロフィール”を得ることができる。

本論文では対象とする知識ベースの学習支援アクションに関する順序関係を図 1 のようなグラフで表し、このグラフのノードで表される各支援アクションに対して適当なリアクションを定義し、これらのリアクション間の因果関係を CN として構成する。そしてこの CN によりユーザプロフィールを求め、得られたプロフィールに基づき対象とする KB の学習支援アクションの時系列を決定するというアプローチをとる。ここでユーザプロフィールは CN 中の各リアクションのとりうるそれぞれの状態に関する生起確率である。各リアクションごとに特定の状態に対する生起確率を、対応するアクションの優先度と定義し、これを支援アクション間の優先順位づけに利用する。

以下、CN の構成法とこれによる優先度計算方法を具体的に述べる²⁾。

4.2 コーザルネットワーク構成法とこれによる優先度計算

(1) リアクションの定義：図 1 のようなグラフのノードで表される学習支援アクションに対しリアクションを定義する。たとえば図 1 の例では、分野解説アクション f_i に対して、その解説を理解したか否かを表すリアクション F_i を定義する。 F_i は 0 か 1 の 2 値をとり、 $F_i = 0$ は理解している状態を、 $F_i = 1$ は理解していない状態を表す。トピック解説アクション t_{ij} に関してもこれと同様のリアクション T_{ij} を定義する。また演習問題アクション e_{ijk} に対しては、解答が正解か否かを表すリアクション E_{ijk} を定義する。 E_{ijk} は 0 か 1 かの 2 値をとり、 $E_{ijk} = 0$ は正解であった状態、 $E_{ijk} = 1$ は不正解であった状態を表す。図 1 のルートノード s は起点を表す特殊なノードであるので、これに対して分岐先を選ぶべきか否かを表

すリアクション S を定義する。 S は分岐数だけの状態数を持ち、 $S = m$ は分岐先 m を選ぶべき状態にあることを表す。

分野解説、トピック解説に対するリアクションの程度(たとえば、“理解している程度”)は、それに関連する演習問題の回答結果から CN の確率伝搬規則によって間接的に計算される。それゆえ 4.3 節で実施した実験では、分野解説、トピック解説に関するユーザリアクションの直接採取は不要であるため、演習問題の回答結果のみをユーザリアクションとして CN に入力している。なおユーザから分野解説、トピック解説に対するリアクションを直接採取する必要がある場合には、着目する解説アクションが終了する前に、提示した解説がどの程度ユーザに理解されたかを、システムはメニューリストから該当項目をユーザに選択させるなどの手段を用いて採取できる。この場合、メニュー項目として、(a) よく理解できた、(b) 半分程度理解できた、(c) ほとんど理解できなかった、などが考えられる。

(2) リアクション間の因果関係に基づくコーザルネットワークの構成：(1) で定義したリアクション群の間には一般に因果関係が存在し、それぞれの因果関係の組に対して条件付確率を与えることができる。たとえば、トピック t_{ij} を理解している ($T_{ij} = 0$) とき、トピック t_{ij} に関する演習問題 e_{ijk} が正解となる ($E_{ijk} = 0$) 確率 $p(E_{ijk} = 0 | T_{ij} = 0)$ を 0.85 のように与えることができる。本論文では、因果関係の抽出と、各因果関係の組に対する条件付確率の付与は、対象とする分野の人間エキスパートが行うものとする。

上記の因果関係を有向グラフで表したとき、得られたグラフ $G = (V, E)$ (V : ノードの集合、 E : エッジの集合) が DAG (Directed Acyclic Graph) であるとする。またグラフ中のノード v の親ノードを $c(v)$ と表すとき、 $c(v)$ の状態が与えられたときの v のとりうる値のすべてについて、式 (1) が成り立つように条件付確率を与える。

$$\sum_v p(v|c(v)) = 1 \quad (1)$$

すると当該 DAG の各ノードのとりうる値の結合確率分布 (joint probability distribution) は式 (2) で与えられる^{3),4)}。

$$P(V) = \prod_{v \in V} p(v|c(v)) \quad (2)$$

そして、(2) で与えられる結合確率分布を持つ上記の DAG はコーザルネットワーク (CN) と呼ばれる。(3) 優先度の定義とこれを用いた適応化の動作：CN 構築後は、一定の初期化アルゴリズム⁴⁾により各ノ

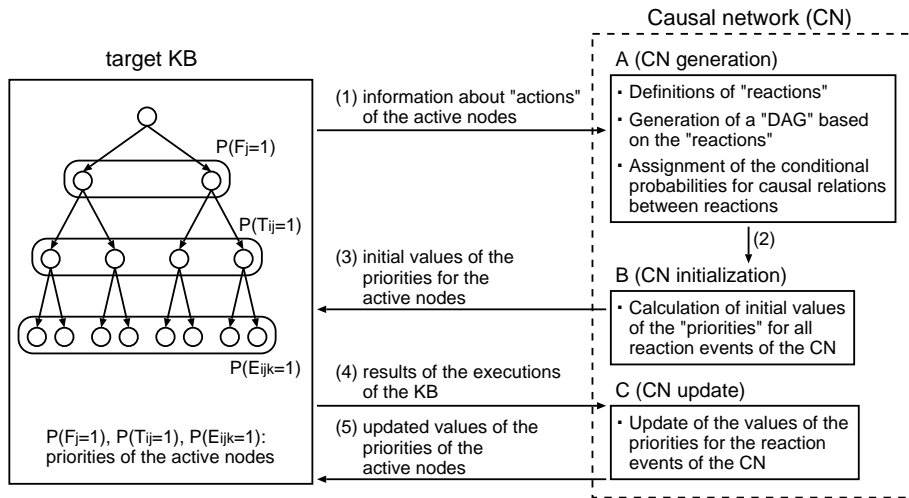


図 6 CN により計算された優先度を利用する適応化法の概念

Fig. 6 Concept of the adaptation method using priorities calculated by the CN.

ドのとりうる値（状態）の“起こりそうな程度”を表す生起確率が計算される．各ノードごとに特定の状態に対する生起確率を，対応するアクションの優先度として対象 KB にフィードバックする．たとえばトピック t_{ij} を理解しているか否かを表すリアクション T_{ij} の理解していないという状態の生起確率 $P(T_{ij} = 1)$ をトピック t_{ij} の優先度とする．なお理解度（Degree of understanding）を $1.0 - \text{優先度}$ と定義する．対象とする KB ではこれらの優先度の初期値（デフォルト値）を用いてユーザに対する最初の一連の学習支援アクションを行う．

一連の支援アクションが終わると，これにより明らかになったリアクションの値を上記の CN の対応するノードの値として入力する．図 1 の解説と演習問題からなる例では，一連の支援アクション終了時に演習問題アクションに関するリアクションの状態が明らかになる．たとえば，演習問題 e_{ijk} 実行後，これが不正解であったときは， $E_{ijk} = 1$ となる．このようにリアクションの値が具体的に与えられると，当該 CN は所定のアルゴリズム⁴⁾により CN 中の各ノードのとりうる状態に対する生起確率の値を更新する．その結果，各ノードで定義された優先度が更新され，これらは対象とする KB へフィードバックされ次の支援アクションの決定に使用される．

以上述べた，対象とする KB (target KB) から CN を生成し，この CN により計算された優先度を対象 KB の実行制御に使う本適応化法の概念を図 6 に示す．なお上述した CN およびそれによる優先度計算の機能は 3 章で述べた分散実行方式のプロトタイプに

おいては，特殊なアクティブノード（エバリエーション・ノードと呼ぶ）として実装しており，図 1 に示したルートノードから葉ノードへ至る一連の学習支援動作が終わるたびに，当該エバリエーション・ノードを実行し上記優先度を更新した後，次の学習支援動作開始のため，ルートノードへ制御を戻すように実現している．

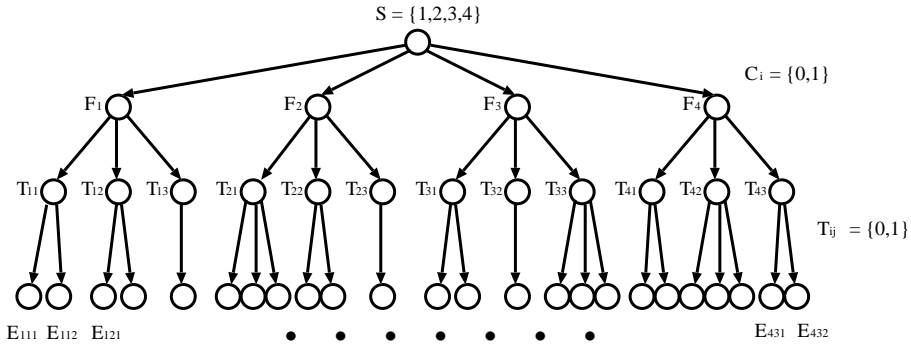
4.3 適応化法の実験例

4.1 節で述べた学習支援動作の適応化法を実験的に評価した．以下，実験モデルと実験結果について述べる．

4.3.1 実験モデル

(a) 実験用 KB：3.1 節で提案した方法により学習支援用 KB を作成した．この KB は第一種情報処理技術者試験受験対策用のコンピュータ基礎知識学習支援 KB で，図 1 に示した階層構造を持つ．具体的には 4 分野（コンピュータ基礎，コンピュータアーキテクチャ，通信ネットワーク，基本ソフトウェア）があり，各分野あたり 3 つの技術トピックの解説を行い，各トピックあたり 1 から 3 題の演習問題に回答させるものである．演習問題の総数は 24 である．

(b) CN の構成：上記 KB のアクティブノードが行うアクションに対してリアクションを定義し，図 7 の構造の CN を得た．ここではアクション間に陽に存在する順序関係をそのままリアクション間の因果関係として表現しており，木構造の DAG となっている．またリアクション間の因果関係の条件付確率は，第一種情報処理技術者の資格を有する人間エキスパートが設定した．表 2 にそれらの抜粋を示す．



$S = m$; field F_m should be selected
 $F_i = 0$; field F_i is understood, $F_i = 1$; field F_i is not understood
 $T_{ij} = 0$; topic t_{ij} is understood, $T_{ij} = 1$; topic t_{ij} is not understood
 $E_{ijk} = 0$; answer of the exercise e_{ijk} is correct
 $E_{ijk} = 1$; answer of the exercise e_{ijk} is incorrect

図7 実験知識ベースに基づき生成されたコーザルネットワーク
 Fig. 7 Causal network obtained from the experimental KB.

表2 リアクション間の因果関係に関する条件付確率値 (抜粋)
 Table 2 Conditional probabilities of the causal relations between reactions (selections).

Node type	conditional probabilities
root node (S)	$P(S=j)=0.25; j=1,2,\dots,4$
field (F_i)	$P(F_i=0 S=i)=0.5, P(F_i=0 S \neq i)=0.5$
topic (T_{ij})	$P(T_{ij}=0 F_i=0)=0.9, P(T_{ij}=0 F_i=1)=0.1$
exercise (E_{ijk})	$P(E_{111}=0 T_{11}=0)=0.95, P(E_{111}=0 T_{11}=1)=0.2$ $P(E_{112}=0 T_{11}=0)=0.95, P(E_{112}=0 T_{11}=1)=0.2$ $P(E_{121}=0 T_{12}=0)=0.95, P(E_{121}=0 T_{12}=1)=0.2$ $P(E_{122}=0 T_{12}=0)=0.85, P(E_{122}=0 T_{12}=1)=0.2$ $P(E_{131}=0 T_{13}=0)=0.80, P(E_{131}=0 T_{13}=1)=0.2$) $P(E_{411}=0 T_{41}=0)=0.90, P(E_{411}=0 T_{41}=1)=0.2$ $P(E_{412}=0 T_{41}=0)=0.90, P(E_{412}=0 T_{41}=1)=0.2$ $P(E_{421}=0 T_{42}=0)=0.95, P(E_{421}=0 T_{42}=1)=0.2$ $P(E_{422}=0 T_{42}=0)=0.80, P(E_{422}=0 T_{42}=1)=0.1$ $P(E_{423}=0 T_{42}=0)=0.80, P(E_{423}=0 T_{42}=1)=0.2$ $P(E_{431}=0 T_{43}=0)=0.85, P(E_{431}=0 T_{43}=1)=0.2$ $P(E_{432}=0 T_{43}=0)=0.95, P(E_{432}=0 T_{43}=1)=0.2$

(c) 実験方法：第一種情報処理技術者試験にまだ合格していない4人の学生を被験者として選び以下の手順で実験を行った。(1) 図7の左側のパス ($F_1 \rightarrow T_{11} \rightarrow E_{111} \rightarrow E_{112}$) を実行する。(2) 実行した演習問題の正解/不正解の結果をCNの対応するリアクションノードのインスタンス値(具体化された値)と

して入力する(図6の(4))。(3) 木構造を持つCNに対する所定の確率伝搬アルゴリズムによりCN中の各ノードの状態に対する生起確率を更新する(これにより特定のノード状態に対応する優先度が更新される)。(4) 更新された各ノードの優先度(1.0 - 理解度)を対象とする知識ベースの対応するアクティブノードにフィードバックする(図6の(5))。(5) 更新された優先度に基づき、ルートノードを出発点として、分野トピック演習問題からなる一連の学習支援動作を行う。(6) 上記(2)~(5)を、学習が終了するまで繰り返す。本実験においては「被験者にとって最も苦手な学習支援パスを明示し、それを実行させる」という適応化戦略をとるため、被験者がシステムにより指定されたパスを実行した結果、演習問題の出来が悪ければ次に同じパスが再度実行される可能性が高く、また出来が良ければ他のパスが実行される可能性が高くなる。また本実験ではあるトピックに関する解説を行った後、それに属する演習問題をすべて実行させ、正解/不正解の結果を一括してCNに入力するというやりかたをとっている。

4.3.2 実験結果

4.3.1 項で述べた実験方法において各被験者について、分野トピック演習問題からなるパスを実行するたびにCNにより更新された各分野、トピック、演習問題の理解度(1.0 - 優先度)の値を収集した。なお演習問題が不正解の場合は、被験者に不正解を通知後、その問題に関する解説を行うようにしたので、次回、同じ問題を解く場合には、ほとんど正解となった。

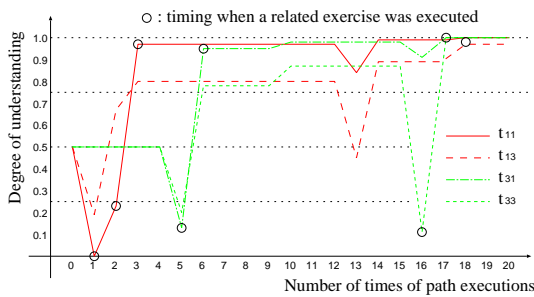


図 8 パス実行回数とトピック理解度の関係の例

Fig. 8 An example of the relationships between degree of understanding of a topic and the number of times of path executions.

図 8 に特定の被験者に着目し、パスの実行を重ねるに従ってある分野のトピックの理解度がどのように変化するかの様子を示す。図の複雑さを避けるため図 8 では 2 分野を選びそれぞれ 2 トピック選んで表示している。図 8 において印の付されている点はそのトピックに関連した演習問題が実行された時点を示している。図 8 においてあるトピックの理解度が急に变化するのは、そのトピックの演習問題を実行した結果、正解により理解度が向上もしくは不正解により理解度が低下したことを示している。また演習問題を実行したトピックと図 7 のグラフにおいて兄弟関係にあるノードもその影響を受けて理解度が変化することが観測される。なお印が付されていない時点で理解度が変化しているのは、図 8 において省略されている他の兄弟トピックに関する演習問題の実行結果の影響を受けて理解度が変化したことを示している。被験者によって不得意の分野が異なるので図 8 の曲線の変化には個人差があるが、全体として回数を重ねるに従い、理解度が向上する様子が見られる。図 9 は、特定の分野についてパス実行回数と分野の理解度の変化の様子を、4 人の被験者について示したものである。曲線の形状には個人差があるが、回数を重ねるにつれ理解度=1.0 に向かい収束する様子が見られる。

[考察]

図 8 に例示したように、本実験を通して「最も苦手なパスをつねに最優先に実行させ、習熟レベルに至るまで反復学習させる」本論文の適応化の戦略が実現されていることが確認された。

また、実際に CN に基づき選ばれ実行されたトピックの時系列が、苦手なトピックを優先させる戦略に基づき人間エキスパートが下す判断と矛盾しないことを以下のように調べた。

(a) まず、上記実験により得られた CN 中の各トピックの理解度を表す値の変化と変化の原因である演習問



図 9 パス実行回数と分野理解度の関係の例

Fig. 9 An example of the degree of understanding of a field and the number of times of path executions.

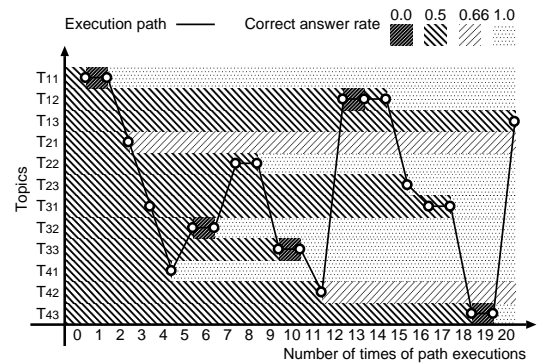


図 10 トピックの正答率の変化と選択されたトピックの時系列の関係の例

Fig. 10 An example of the relationships between changes of the correct-answer-rates of the topics and a sequence of the selected topics.

題の実行結果との相関関係を、すべての実行された学習支援パスについて、この問題領域に関するエキスパート（第 1 種情報処理技術者）がチェックし、選択されたトピックの履歴に矛盾がないことが確認された。

(b) 次に、トピック選択の妥当性をマクロにチェックする 1 つの方法として、実際に被験者により実行されたトピックの演習問題に関する正答率 (correct-answer-rate: 正解となった問題数/実行された問題数) の変化と、実験で選択されたトピックの履歴との関係に矛盾がないかどうかを調べた。図 10 にこのような関係の例を示す。図 10 に例示したように、トピック選択の各ステージにおいて、正答率の低いトピック以外のトピックが選ばれることはなく、実験結果はエキスパートからみて矛盾のないものと判断される。なお図 10 において、実際に実行される以前の各トピックの正答率の値は、実験において CN が計算した理解度の初期値を用いた (各トピックの理解度の初期値は 0.5)。

以上のことからより本適応化法は、前提とする階層型の学習支援動作モデルに対して有効な方法となりうるものと考えられる。

5. む す び

衛星通信を利用した教師なし遠隔学習支援システムのための分散型知識ベース実行方式を提案した。本方式の目的はユーザに対する迅速な応答性の提供と、ユーザの理解の特性(ユーザプロフィール)に合わせて学習内容を自動的に変える適応化機能の実現にある。この目的のため、学習内容の適応化を容易とするため、まず知識ベースを、アクティブノードと呼ぶ独立動作可能な部分知識の集合からなる内容と、アクティブノード間の実行順序を制御するためのメタ知識であるコンテキストグラフにより構築する方法を導入した。また上記知識ベースの実体をサーバ計算機におき、実行をクライアント計算機で行う先取り機構付き部分知識実行機構を提案し、衛星通信を使用した実験により、ユーザに対し迅速な応答性を提供できることを示した。

さらに対象とする知識ベースの各学習アクションに対して実行の優先順位を表す情報(優先度)を対応づけ、これらの優先度をユーザプロフィールに応じて変化させることにより、ユーザに対して望ましい学習支援時系列を選択する適応化法を提案した。本適応化法の中核部である優先度計算機構は、対象とする知識ベースの各学習支援アクションに対して定義されたリアクション事象に基づきコーザルネットワークとして実現した。上述の知識ベース構築法により実験用知識ベースを作成し、4人の被験者を用いて上記適応化法の実験を行った。その結果、本適応化法による学習支援動作は人間エキスパートのそれと矛盾しない妥当なものであり、階層型学習支援モデルに対して本手法を使用できる見通しが得られた。

今後は一般的な単連結構造や閉路を含むより複雑な構造を持つCNへ本適応化法の拡張を行う予定である。一方CNによる推論法はパラメータ変動(条件付確率の値の変動)が推論結果に与える影響が少ない頑健な推論法であるといわれているが⁴⁾、CNを利用する本適応化法がこのような性質を備えているか否かを今後検証する必要があると考える。

また本適応化法においてはCNの構成にあたり人間エキスパートが条件付確率の値を与えるものとしているが、学習支援システムの実際の運用が開始された後はこれらの値の適正化を柔軟に行うことも必要であると考えられる。今後はシステム稼働中に必要なデータを取得・蓄積し、適切な方法により上記の条件付確率の値

を更新する仕組みを明確にすることが課題である。

参 考 文 献

- 1) 近藤喜美夫：VSATの大学間教育交流ネットワークへの応用，電子情報通信学会論文誌，Vol.79, No.8, pp.777-782 (1996).
- 2) Fujiwara, Y., Okada, S., et al.: Performance Evaluation of VEEC: The Virtual Execution Environment Control for a Remote Knowledge Base Access, *IEICE Trans. Comm.*, Vol.E-80B, No.1, pp.81-86 (1997).
- 3) Pearl, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*, Morgan Kaufmann (1988).
- 4) Neapolitan, R.E.: *Probabilistic Reasoning in Expert System Theory and Algorithm*, John Wiley & Sons (1990).
- 5) Chen, Z.: Users and System Adaptivity: A GSPS Perspective, *Int. J. General Systems*, Vol.24, No.1/2, pp.33-42 (1996).
- 6) Robertson, P. and Brady, J.M.: Adaptive Image Analysis for Aerial Surveillance, *IEEE Intelligent Systems*, Vol.14, No.3, pp.30-36 (1999).
- 7) Kokar, M.M., Baclawski, K. and Eracar, Y.A.: Control Theory-Based Foundations of Self-Controlling Software, *IEEE Intelligent Systems*, Vol.14, No.3, pp.37-45 (1999).
- 8) Karsai, G. and Sztipanovits, J.: A Model-Based Approach to Self-Adaptive Software, *IEEE Intelligent Systems*, Vol.14, No.3, pp.46-53 (1999).
- 9) Jameson, A.: Numerical Uncertainty Management in User and Student Modeling: An Overview of Systems and Issues, *User-Modeling and User-Adapted Interaction*, 5, pp.193-251 (1996).
- 10) Martin, J. and Vanlehn, J.: A Bayesian approach to cognitive assessment, Nichols, P., Chipman, S. and Brennan, R. L. (Eds.), *Cognitively Diagnostic Assessment*, Hillsdale, NJ, Erlbaum (1995).
- 11) Conati, C. and Vanlehn, K.: POLA: a student modeling framework for Probabilistic On-Line Assessment of problem solving performance, *Proc. 5th International Conference on User Modeling*, pp.75-82 (1996).
- 12) Conati, C., Gertner, A.S., Vanlehn, K. and Druzdzel, M.J.: On-Line Student Modeling for Coached Problem Solving Using Bayesian Networks, *Proc. 6th International Conference on User Modeling*, pp.231-242 (1997).
- 13) Collins, J.A., Greer, J.E. and Huang, S.X.: Adaptive Assessment using Granularity Hierarchies and Bayesian Nets, *Proc. 3rd Interna-*

tional Conference on Intelligent Tutoring Systems ITS'96, pp.569–577 (1996).

- 14) Charniak, E. and Goldman, R.P.: A Bayesian model of plan recognition, *Artificial Intelligence*, Vol.64, No.1, pp.53–79 (1993).
- 15) Huber, M.J., Durfee, E.H. and Wellman, M.P.: The Automated Mapping of Plans for Plan Recognition, *Proc. 10th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp.344–351 (1994).
- 16) Pynadath, D.V. and Wellman, M.P.: Accounting for Context in Plan Recognition with Application to Traffic Monitoring, *Proc. 11th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp.472–481 (1995).
- 17) Jameson, A., Schafer, R., Simons, J. and Weis, T.: Adaptive Provision of Evaluation-Oriented Information: Tasks and Techniques, *Proc. 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.1886–1893 (1995).
- 18) Mulken, S.: Reasoning About the User's Decoding of Presentations in an Intelligent Multimedia Presentation System, *Proc. 5th International Conference on User Modeling*, pp.67–74 (1995).
- 19) 藤原祥隆, 岡田信一郎: 適応化機能を備えた分散型エキスパートシステムの一実現法, 平成10年度電気関係学会北海道支部連合大会論文集, p.418 (1998).
- 20) 高倉伸樹, 藤原祥隆, 岡田信一郎: JAVAに基づく仮想実行環境制御方式の衛星通信環境における性能評価, 情報処理北海道シンポジウム2000論文集, pp.100–101 (2000).
- 21) 武田一真, 藤原祥隆, 岡田信一郎: 非対称ネットワークを用いた知識ベースの遠隔アクセス方式のシミュレーションによる評価, 信学技報, SAT99–108, pp.1–7 (2000).
- 22) 藤原祥隆, 松澤文太郎, 岡田信一郎: Causal networkによる適応化機能を備えたプロダクションシステム, 信学技報, KBSE99–44, pp.9–14 (2000).

(平成12年10月26日受付)

(平成13年4月6日採録)



藤原 祥隆 (正会員)

昭和18年生。昭和43年北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年電々公社(現NTT)入社。平成元年より北見工業大学工学部教授。工学博士。エキスパートシステム, 知的CAI, 衛星通信を利用した知識ベース利用環境等, 知識を利用した情報処理全般に興味を持つ。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



岡田信一郎 (正会員)

昭和44年生。平成4年北見工業大学工学部電子工学科卒業。平成6年同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。現在, 同大学工学部情報システム工学科助手。知的教育支援システム。衛星通信を利用した知識ベース遠隔利用の研究に従事。電子情報通信学会会員。



高倉 伸樹

昭和50年生。平成11年北見工業大学工学部情報システム工学科卒業。平成13年同大学大学院工学研究科情報システム工学専攻博士前期課程修了。同年株式会社ジャパンテクニカルソフトウェア入社。在学中は知識ベース遠隔利用技術の研究に従事。



松澤文太郎 (学生会員)

昭和52年生。平成12年北見工業大学工学部情報システム工学科卒業。現在, 同大学大学院工学研究科情報システム工学専攻博士前期課程在学中。コーザルネットを使用したプロダクションシステムの研究に従事。