

## マルチエージェントを用いた 'Calculation' プレイ支援システムの検討

藤井大輔\* 小堀 聡\* 中村 孝\*\*

\*龍谷大学理工学部 \*\*大阪産業大学 工学部

本報告ではマルチエージェントによるゲーミング支援システムの設計と構築について述べる。筆者らはカードゲーム'Calculation'をプレイする人間の学習過程に着目することによってユーザとコンピュータが相互に協調的に作用し、相乗的な効果を生み出すような問題解決支援システムを研究してきた。まず初心者に対する予備実験より、本ゲームにおける学習過程について検討した。つぎにその検討結果を踏まえ、システムを4つの独立したエージェントに分けることを提案し、さらにシステム構築の段階として3つのレベルを設定する。最後にシステムの機能と構成、そして最初のレベルにおける実験について報告する。

## 'Calculation' Playing Support System with Multi-Agent

Daisuke FUJII\* Satoshi KOBORI\* Takashi NAKAMURA\*\*

\*Faculty of Science and Technology, Ryukoku University

\*\* Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University

This report describes design and construction plan of gaming support system consisting of multi-agent. By focusing learning process of card game 'Calculation' player, we have studied problem solving system that user and computer can work cooperatively and make synergetic effect. First we investigated the learning process in this game from the preliminary experiment. Next, we designed the system parted into 4 independent agents, and the steps to construct system into 3 levels. Finally, we report on the functions and structures of the system and on the implementation of the first level.

## 1 はじめに

筆者らは、人間とコンピュータの協調による問題解決支援システムの構築を目的とした研究を行ってきた。

研究方針のひとつとして、題材にカードゲーム'Calculation'を選び、これを解決しようとするプレーヤの行為による学習 (learning by doing) の過程に注目し、プレーヤを支援するシステム構築を試みる。

すなわち、我々は以下のような課題に取り組んでいる。

**初心者から熟達者まで対応可能な支援システムの構築** 我々はコンピュータシステムが問題のすべてを自動的に (人間の関与なしに) 解決することを目指しているわけではなく、人間とコンピュータの協調による悪構造問題のより「よい」解決を目指している。

ここでいう「よい」問題解決とは、結果としての成功率だけではなく、人間の学習過程を考慮し、ユーザの知識や熟達のレベルに対応した支援が可能であることを想定する。

**悪構造問題を解く人間の学習過程の解明** 我々はユーザの学習過程をいくつかの段階に分けて考える。行為による学習における方略獲得のための基礎的メカニズムとしては Anzai [1] のものがあり、我々の場合にもあてはまる点が多くあると思われるので、このモデルを基本として研究をすすめている。Anzai による学習過程の段階とは、

1. 初期問題空間の構成
2. よくない例の収集
3. よくない例を回避する手続きの獲得
4. よい例の収集と下位目標生成手続きの構成
5. 下位目標構造内のパターンの発見

である。

**問題解決支援システムを利用する人間の特性の解明** Rasmussen のユーザの操作系の分類 [2] によれば、本システムは間接操作システムに類別されるが、間接操作系においてはユーザとシステムの間には二重界面 [3] が存在する。つまり、学習の初期段階では、ユーザが直接接触する「操作インタフェース」に対する認識資源の投入が大きく比重を占め、操作インタフェースに熟達すればするほど、実際にタスクを処理し実

行するための「制御インタフェース」に思考力を大きく配分できるようになる。

人間-コンピュータ相互作用における理想の設計とは、ユーザが操作インタフェースを意識することなく (道具の身体化 [4])、タスクの処理に対する認識資源の投入に集中できるようなものである [5]。

我々はこのことを考慮し、ユーザインタフェースおよびタスク処理の両者に関して、人間の学習による「成長」をシステムの評価基準に含むような設計を考える。

我々の行なった実験の手順は以下の通りである。

1. Calculation における学習者の立ち上げ段階から熟達段階にいたるまでの行為による学習の過程を分析し、
2. そのなかから重要な要求項目を抽出し、
3. それに対応する機能を問題解決支援システムに付加し、
4. その機能の有効性を確認する。

本報告では、上の方針にしたがって行なった実験データの分析を通して、Calculation プレイ支援システムの設計と構築に関する検討と提案を行なう。

## 2 Calculation について

Calculation のルールとゲームとしての特徴について、また認知工学的な研究材料としての特徴について述べる。

### 2.1 ルールとキーポイント

Calculation は一人で行なうカードゲームである。シャッフルして伏せられた、ジョーカーを除く 52 枚の手札を 1 枚ずつめくり、4 列の「場」を作業空間として、4 列の「台」にあらかじめ定められた順番に置いていく (図 1 参照)。台札の列は 13 枚ずつで、それぞれ等差 1,2,3,4 の数列になっている。'13'(キング) 以上は 13 の剰余に置き換える。つまり台札の並びは以下のようになる。

- 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10, J, Q, K
- 2, 4, 6, 8,10, Q, 1, 3, 5, 7, 9, J, K
- 3, 6, 9, Q, 2, 5, 8, J, 1, 4, 7,10, K
- 4, 8, Q, 3, 7, J, 2, 6,10, 1, 5, 9, K

台へは列の先頭から順にしか置くことができず、場は先入れ後出し (First-In-Last-Out:FILO) のスタックになっており、文字通り、最後に置いたものから順にしか取り出すことができない。手札・場札ともに空になり、すべてのカードが台に並べられたら成功である。それ以外はすべて失敗である。

めくったカードをそのまま台に置くことができない場合は場に置かなくてはならないが、台に置けるものを意図的に場に置く場合も含めて、この「場」のスタックとしての使い方が、ゲームの最大のキーポイントとなる。また、シャッフルした手札は完全にランダムに出現するので、ある程度は確率的な予測が可能だとしても、さまざまな出かたに対応した方略を立てる必要があるという点も重要である。

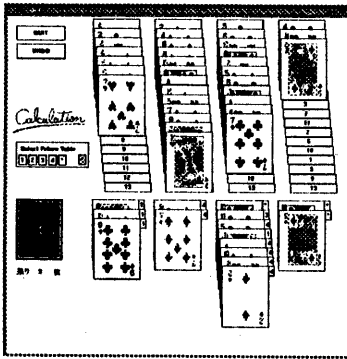


図 1: Calculation プレイ画面

## 2.2 研究材料としての特徴

Calculation を題材として選んだのは以下のような特徴を持っているからである。

まず第 1 に、Calculation は一人プレイなので、複数の人間の行為や心理を考慮に入れる必要がなく、プレーヤの思考の解析に影響を与える要因を減らすことができる。また、1回のプレイ時間が相対的に短く、問題としての規模や複雑さも一般人にとってさほど高度ではない。

第 2 に、Calculation の一般的な解法は確立されておらず、コンピュータによる解決も研究されている [6] が、人間の成功率を上回ることは難しいことが知られている。このことは、Calculation がいわゆる悪構造問題であることを示唆し、また、人間にはそういう悪構造問題に対する適切な解決方法を見いだす能力があること

を意味している。この点よりコンピュータと人間の能力の比較という視点を見いだすことができる。

第 3 に、人間による成功率は最初はほとんど 0% に近いが学習によって大きく改善され、熟達すれば 90% 以上になるとされている [7]。このことは初心者と熟達者の方略の差が非常に大きいことを意味し、学習過程におけるプレーヤの習熟度を明確にしやすい。また、成功率の差が大きいということは、習熟するまでに長い時間と多くの認知的負荷をプレーヤに要求するともいえるので、これをコンピュータが軽減する余地はかなり大きいと考えられる。

第 4 に、手札の順序によって難易度の範囲が非常に大きい。手札の組合せはおよそ  $2.6 \times 10^{65}$  通りであるが、場をほとんど使う必要のない組合せから、ほとんどの手札を場にスタックしたうえで初めて成功するような組合せまで、ありとあらゆる難易度のものが存在する。しかしこれは、逆にいえば手札の並び方にある法則を与えることによって、ゲームの難易度をある程度コントロールすることができる。実際我々の行なった実験も、学習効果の比較をしやすくするなどの目的で、並び方に一定の規則を設けて行なった。

これらの点で、Calculation は人間の学習過程や人間とコンピュータとの協調問題解決について検討するのに適当な課題であるといえる。

## 3 予備実験

### 3.1 予備実験と分析結果

我々はまず、上述したような Calculation の特徴から見いだされるものにもとづいて、プレーヤの学習過程について予備実験を行なった。予備実験では初心者に対してあらかじめ用意しておいた 30 通りのカードデータについてプレイさせ、記録を分析し、同時に我々がオブザーバとしてプレイを観察し、事後にプレーヤにインタビューを行なった。

その結果、つぎのようなことが明らかになった。

- 初心者の学習過程は、熟達したプレーヤの問題解決過程に比較して方略の変化が大きい。
- 学習がすすむにつれて、方略を決定する諸要因の影響の強さあるいはプレーヤにとっての優先順位が変化する。

- 熟達するまでにたどる方略やその要因の変遷は個人によって異なり、その要因としてはさらに多くの項目が関与していると考えられることができる。
- 立ち上げ段階から熟達段階までを概観することにより、初心者に固有の要求項目、熟達者に固有の要求項目、および両者に共通の基本的要求項目を見いだすことができる。

### 3.2 支援機能の検討

上記の結果より、我々の目指すシステムに有用であると思われる機能を検討した。機能の高さあるいは複雑さによって分類整理すると以下のようなになる。

1. 消極的支援機能 (Negative Support Function): 予定メモ・操作ミス警告・致命的エラー警告  
プレーヤに対して最低限の支援情報を提供する。プレイの傾向、プレーヤの意図などは考慮しない。
2. 積極的支援機能 (Positive Support Function): 危険手警告・アクティブメモ  
プレーヤに対してあらかじめ知らせておいたほうが良いことを知らせたり、プレーヤの希望するポイントを重点的に知らせる。
3. 対話的支援機能 (Interactive Support Function): 状況説明・説明つき次手提示・システムのユーザ適応的变化  
プレーヤのレベル、能力をシステムが診断し、それにしたがってシステムが機能を変化させ、適応的にプレーヤを支援する。

## 4 システムの設計

予備実験での結果をもとに、本実験で使用するプレイ支援システムの設計を行なった。以下にシステムの概要と各部分の詳細を紹介する。

### 4.1 システムの概要

#### 4.1.1 システムに対する要求項目

まず、上記の機能を実現するために要求される項目を整理する。

- プレーヤが理解すべき項目を最小限にすること

- プレーヤが本質的な部分を判断することに最大の力を注ぐことができること
- プレーヤが方略に関する研究が続けられる自由度を保っていること
- プレーヤが求めている情報を提供すること
- プレーヤが必要でない情報は隠蔽すること
- プレーヤのレベルを的確に診断できること
- 初心者に対する効果的な教育支援ができること
- 上級者は心的負荷を感じずに自分の持つ方略をミスなく実行できること
- 自明的な解決手順は自動計算できること

#### 4.1.2 システムの基本構成

上記の要求項目について検討し、目指すべきシステムを設計した。以下にその構成を述べる。トリプルエージェントモデル [8] を基本構造とし、それを一部拡張した。すなわち、システムはプレーヤエージェント、ユーザインタフェースエージェント (User Interface Agent: UIA)、タスク処理エージェント (Task Processing Agent: TPA)、診断制御エージェント (Diagnosis and Control Agent: DCA) という、独立性の高い4つのエージェントを持つ (図2参照)。

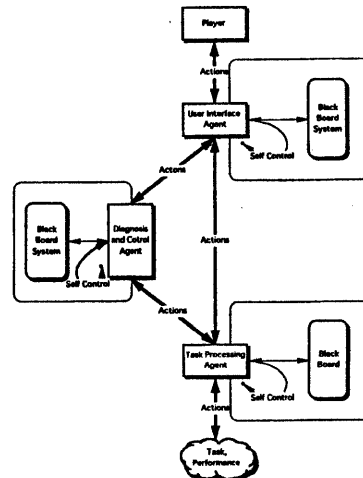


図 2: システム概要図

プレーヤ以外のエージェントはサブシステムとして、複数の知識源からなる黑板システムによって構成されている。各々の黑板システムは独立したスケジューラを持ち、独立した振舞いをする。

トリプルエージェントモデルから拡張された「第4のエージェント」であるDCAは他のエージェントの世話役であり、以下のような機能を受け持っている。

1. 各エージェントのスケジューラ間のインタラクションの調整、
2. エージェントの振舞いの記録
3. エージェントの振舞いの分析
4. エージェントの分類および新たな類型化

これらの機能は、4.1.1節で述べたシステムの機能のうち、特にユーザの熟達のレベルおよびその時点における問題解決能力をシステムが知り、それに対して適応的な振舞いをするようなシステムを実現するために必要であると考ええる。

## 4.2 エージェントとサブシステム

### 4.2.1 各エージェントの機能

それぞれのエージェントの機能を以下に示す。

**プレーヤエージェント：** これはプレーヤ自身である。行為者として各種のオペレーションを行なう。ゲームを進行させる「手」、ゲームの状態に関する情報要求、各種の支援機能の利用およびその説明要求などである。

**ユーザインタフェースエージェント (UIA)：** プレーヤとタスク処理エージェントの間で、両者とのインタフェース機能を果たす。

- プレーヤのオペレーションを受け継ぎ、インタフェースレベルにおける診断を行ない、TPAにタスク要求を引き渡すが、この段階でなんらかの問題が生じればプレーヤにメッセージを表示したり、場合によってはプレーヤのタスク要求を拒否する。
- また、TPAからのメッセージを受けてプレーヤに伝えるが、その際にも独自の診断機能が働く。
- DCAから受けたエージェントの診断結果、オペレーションの記録およびDCAのもつプレーヤデータベースの参照により、プレ

ーヤの知識、問題解決能力、および熟達レベルに対応してスケジューラの機能パラメータを変化させる。

**タスク処理エージェント (TPA)：** タスクの処理を実行する。

- 主としてUIAからの要求を受けてタスクを処理する。
- 実行結果を観察・記録し、パフォーマンスの解析を行なう。
- DCAから受けたエージェントの診断結果、オペレーションの記録およびDCAのもつプレーヤデータベースの参照により、プレーヤの知識、能力、および熟達レベルに対応してスケジューラの機能パラメータを変化させる。

**診断制御エージェント (DCA)：**

- エージェント間のインタラクションが必要な場合、各スケジューラからDCAのもつ黑板にメッセージやステータスが書き込まれ、DCAがその調整・診断を行なう。
- 他の3つのエージェントの振舞いをすべて記録・分析し、それぞれの振舞いによって類型化し、エージェントデータベースに登録する。エージェントデータベースは他のエージェントに参照される。
- 他のエージェントで得られたプレーヤの行為のデータを統合し、プレーヤの熟達レベル、あるいは能力などをパターンによって分類する機能を持ったプレーヤデータベースに登録する。
- DCAより類型化等の報告をうけた各エージェントは、それによって振舞いのパラメータを変更し、その体系を改変する。

### 4.2.2 サブシステム

プレーヤ以外のエージェントはサブシステムとして、明確なレベルを持たない黑板システムを採用している。

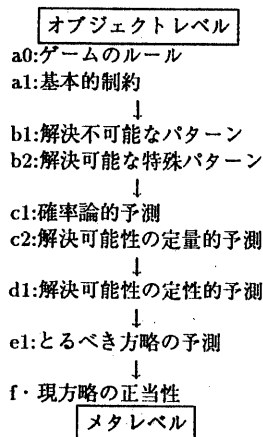
それぞれのエージェントは独立した黑板をもっている。黑板システムの機能は一般的なものである。

1. オペレーションはすべて黑板に書き込まれる。

2. そのオペレーションをトリガとする知識源が発火する。
3. 複数の知識源の発火による競合が生じた場合、あるいはひとつの知識源の発火であってもその確信度によってはスケジューラが機能し、優先度を診断する。

#### 4.2.3 黒板の設計

本システムの黒板はいくつかのレベルをもっているが、それはたとえば HEARSAY-II[9] のような固定的なものではなく、各レベルのトリガはかならずしも固定的な上下関係を持っているわけではない。以下に、知識源の並びの一例 (TPA の黒板) をあげておく。



#### 4.2.4 スケジューラの設計

基本的にはプロダクションルールによるルールベースシステムをもってスケジューラを構成する。スケジューラの機能は、以下のようなものを設定した。

- プレーヤの行為を監視し、エージェントの発火とスケジューラの判断に対してプレーヤがどういう反応をとったかを記録しておく。
- プレーヤ個人に固有な方略つまり「くせ」と、より一般性のある方略とに分類しながら「事例データベース (できれば定性的属性つきの)」を更新していく。
- 上記の機能よりプレーヤモデルを内部に生成し、他のスケジューラ、とくに DCA との対話により、それを動的に修正する。

## 4.3 段階的構築

上述したシステムは最終的な目標システムであり、構築までに多くの時間を要する。そこで、実験を継続的に進んでいくのに必要なレベルというものを3つに設定し、それぞれのレベルにあわせたシステムを段階的に構築する。3つのシステムは独立しているものではなく、拡張していくように設計する。実験データの保証を重要視する必要があるからである。

ここでは3.2での検討を受けて、各機能を実現する段階を設定し、それらを

1. 消極的支援レベル (NSL:Negative Support Level)
2. 積極的支援レベル (PSL:Positive Support Level)
3. 対話的支援レベル (ISL:Interactive Support Level)

とする。

## 5 システムの構築と評価

### 5.1 NSL での構築と実験

我々は消極的支援レベル (NSL) におけるシステム構築およびそれによる実験を行なった。構築した機能は、UIA 部分が UNIX X-Window 上の GUI によるゲームのビジュアル化とマウスオペレーション、TPA 部分が直前の手のアンドゥ機能、手札のプット可能部分の表示、そして予定メモ機能である (エラー警告機能は除く)。予定メモ機能というのは、めくった手札を場に置く場合、将来どの列の台に置く予定なのかというメモをその札につける、という機能である。カードは、難易度のばらつきを防ぐ目的で、1~13の数字がひとつおき出現してから次の1~13が出現する、というセットを30個用意して、それを使用した。プレーヤの行為は、カード移動元、カード番号、カード移動先、アンドゥと予定メモの利用について記録をとった。実験の諸条件は次のようにした。

- プレーヤ4名のうち2名には、上述のとおりシステムを用い、残りの2名には上述の基本機能だけで予定メモ機能のないシステムにてプレイさせた。
- 被験者には、Calculation 未経験者を4名選び (いずれも理工系の大学生および大学

院生), Calculation 実行環境の使い方の説明とプレイに関する注意事項(成功する努力をする, 方略の重要性, プレイ中に人の意見を聞かない等)を伝達した。

- すべての被験者に対してあらかじめ30通りの手札データを用意しておき, 別々の日に全く同じ順序でプレイさせ, すべてのカード操作と予定メモ内容を記録した。

実験の結果, 成功回数はそれぞれメモ機能ありでは12回と11回, メモ機能なしでは14回と9回であった。

## 5.2 実験結果の検討

取得した記録に対して, 実行時間, 未定の回数, メモ変更回数, アンドゥの回数, 手札から直接台札に置いた数, カードを予定メモ通りに置いた回数などについて全体・成功例・失敗例に分けて解析を行なった。

全体としてはまず, 30回のプレイではメモあり・メモなしの両ケースともに, 一定の方略の形成, 自分の方略の良否の認識が十分なされていない。次に, 上にあげたデータの各要素について統計的に解析した結果, 次のことがわかった。

1. 実験の序盤(10回程度まで)の範囲では, 予定メモを利用しない割合が大きくまた予定変更の回数も少ない。
2. 成功例と失敗例に分けて調べてみると, 予定メモの通りにカードを台札に置く回数は, 成功例ではプレイ回数とともに増加しているが失敗例ではそのような傾向は見られない。
3. これらのことより, 最も初期の段階では予定メモは十分に活用されていないが次第に有効に利用されるようになり, 特に成功例では大きな役割をはたすと考えられる。
4. 逆にメモなしの例においては, 場札の有効な使い方の学習が進まず, 実験の後半(20回目以降)になってもなお, 手札の出方によって台札の進み方が大きく左右されるような結果になっている。

次に再現プログラムによって, 個々の記録について被験者の学習過程を再現し, 観測・解析を行なった。さらに, プレーヤにインタビューを行ない, 各機能の有効性についての評価を聞いた結果, 学習の立ち上げ段階における学習支援へのメモの有効性として次のことが推測された。

1. 予備知識の影響: 予定メモの利用を勧めることは, どの台に札を置くかという計画の重要性を認識させるという意味で問題解決の糸口としての予備知識を与え, プレーヤの学習を促進する。
2. 下位目標の発見と維持: 場札を有効に活用する方法, たとえば場札の列に台札の逆順のまとまりを作ればよいことが, 予定メモの表示により視覚的に認識される(図1参照)。また実際には連続した逆順のまとまりを作ることは容易ではないが, 台札における(列間の)位置関係を把握しやすいので, 台札に対して矛盾せずに交差した場札の置き方をすることができる。つまり, 見いだした下位目標を失わずにやり繰りできるわけである。
3. 記憶力と集中力の影響: 予定メモは記憶の補助になり, プレーヤはその分思考に集中できる。これは持続的な思考活動に対する負担軽減の機能に対応する。
4. 行為の良否の認識: 予定メモにより思考中途結果の外化がおこる。外化によって生じる他者(もうひとりの自分)との対話により, プレーヤは自分の行為の意味, あるいは自分の方略にとっての良否をよりはっきり認識することができる。

## 6 むすび

我々は記録を統計的に, あるいは個別詳細に(ひとつひとつの行為を評価して)分析し, もっとも初期の支援機能である「予定メモ」の機能についていくつかの点を見いだした。しかし, 本報告での分析は主として初心者 of 初歩的な段階のデータに限定されていたので, プレーヤの個性に起因するデータのばらつきがかなりあった。さらにはそのばらつきの原因を特定することは困難であった。これらの点においては十分な分析とはなっていないといえる。

本実験はシステムの設計段階を終えて最初の一步を踏み出したにすぎず, システム全体としての評価は, 今後の構築と実験の進展を待たざるをえない。すなわち, システムの設計図に基づいた構築および実験を進めると同時に, 学習者が十分に熟達するまでの過程の分析を継続的に行ない,ゲーミングの学習過程の諸要素を抽出する作業をつづける必要がある。

また、人間の行為をシステム全体の一部として位置づけることにより、システムにおいて定性的な評価であらわす部分と、定量的な測定あるいは反応が可能である部分を明確にし、両者をゆるやかに統合するしくみを考案する必要がある。

本研究はゲームにおける問題解決を主題としており、その意味では「トイワールド」を扱っているに過ぎず、これがそのまま「リアルワールド」への橋渡しとなるような楽観的な見通しがあるわけではない。しかし、ここで得られた知見あるいは提案し構築されたシステムの枠組みが、他の(特に悪構造な問題の)問題解決支援システムを構築する際に利用されうるものであるかどうかという、一般化への努力を続けていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Anzai, Y.(1987). Doing, Understanding, and Learning in Problem Solving. In D.Klahr, P.Langley, & R.Neches(Eds.). *Production system models of learning and development*. MIT Press. (安西祐一郎(1992). 問題解決における行動、理解、学習. 安西・石崎・大津・波多野・溝口 編. 「認知科学ハンドブック」共立出版.)
- [2] Rasmussen, J.(1986). Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering. (海保・加藤・赤井・田辺共訳(1990). 「インタフェースの認知工学」. 啓学出版.)
- [3] 佐伯 胖 (1988). 機械と人間の情報処理—認知工学序説. 竹内 啓編. 「意味と情報」. 東京大学出版会.
- [4] Jackendoff, R. (1984). Sense and reference in a psychologically based semantics. In T.G.Bever, J.M.Carroll, & L.A.Miller(Eds.), *Talking minds: The study of language in cognitive science*. MIT Press.
- [5] 加藤 隆 (1994). 認知工学の現状と展望. 認知科学, Vol.1, No.1, 72-86.
- [6] 花澤 正純 (1987). カードゲーム「計算」の計算機用アルゴリズム. 情報処理学会記号処理研究会資料, 43-4
- [7] System5(1985), 「計算」について(続). 数学セミナー, Vol.24, No.7, 53-57
- [8] Card, Stuart K.(1989). Human Engineering and Artificial Intelligence. In P.A. Hancock, & M.H. Chignel(Eds.), *Intelligent Interfaces:Theory, Research and Design*. Elsevier Science Publishers B.V. (長町三生監修, 認知科学研究会訳(1991)「知的インタフェース—人とマシンとの知的相互作用—」. 海文堂.)
- [9] Erman, L.D., et al(1980). The HEARSAY-II speech understanding system: Integrating knowledge to resolve uncertainty. *Computing Surveys*,12(2):213-254. (中島訳(1980). HEARSAY-II 音声理解システム:不確定性の解決のための知識の統合. bit, 別冊 11:53-91.)