



Title	知的教育システムにおける視覚メディア利用技術の開発
Author(s)	堀口, 知也
Citation	大阪大学, 1997, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3129035
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

知的教育システムにおける視覚メディア利用技術の開発

1996年12月

堀 口 知 也

知的教育システムにおける視覚メディア利用技術の開発

1996年12月

堀 口 知 也

内容梗概

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科（応用物理学専攻）後期課程在学中に行った、ITS (Intelligent Tutoring System)におけるコミュニケーションの高度化を指向したマルチメディア利用技術に関する研究の成果をまとめたものであり、次の5章をもって構成されている。

第1章においては、本研究の目的および意義について述べ、本研究により得られた諸成果を概説している。特に、知的教育システムにおける人間－計算機間の高度な双方向コミュニケーションをマルチメディアを用いて実現することの重要性、およびマルチメディアが学習者に与える効果を見積もった上での運用の重要性を指摘している。

第2章においては、対象分野として歴史を取り上げ、人間－計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現するシステムの設計・開発について述べている。従来より、物理学に代表されるような定式化された知識を扱う分野については、マルチメディア技術を用いたシミュレーション環境を構築することにより、高度な双方向のコミュニケーションを実現するシステムが多く開発されているが、定式化されない知識を扱う分野についての研究はなされていない。そこで本研究では、定式化されない知識の代表的な例として歴史を取り上げ、そのような分野についても、適切なマルチメディア技術、すなわちここでは知識の視覚化ツールを用いることによって高度な双方向のコミュニケーションを実現できることを示し、さらに知識の構造化にも貢献し得るという結果を得た。

第3章においては、マルチメディアが人間に与える影響を適切に定式化することにより、その効果を見積もった運用が可能となることを示した上でその実現手法を提案し、計算機上に実装されたシステムを用いた検証実験を行ってその有効性を確認している。まず対象とするメディアとして、力学における学習者の立式上の誤りを可視化する挙動シミュレーション (Error-Based Simulation: EBS) について概説し、次にそれが学習者に与える効果を見積もるための指針として、EBSが正規の挙動シミュレーションとの間に示す定性的差異に注目した誤り可視化条件を定式化した。さらにその誤り可視化条件に基づいてEBSの効果を診断・制御するための機能を、定性推論技法を用いて実現する手法を提案し、実験によってその有効性を確認した。

第4章においては、第3章の知見に基づいて、EBSの誤り可視化効果のより詳細な要因の抽出・分析、また新たな可視化表現方法の導入の検討を行った。これによってEBSの誤り可視化効果を決定する諸要因とその構造が明らかとなり、より高度で統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現へ向けての展望を得た。ここでの知見は挙動シミュレーションという視覚的メディアに限られてはいるが、一般のマルチメディアが人間に与える効果を見積もる際の要因分析のための

重要な指針を与えるものとする。

第5章においては、本研究で得られた成果を総括し、今後に残された課題の検討を行っている。

関連発表論文

A. 学会誌掲載論文

1. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "歴史の知識構造化を支援する知的教育システムの開発", 教育システム情報学会誌, Vol.12, No.2, pp.109-120 (1995) .
2. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御", 人工知能学会誌, Vol.12, No.2 (1997) . (掲載予定)

B. 国際会議発表論文

1. Horiguchi, T., Hirashima, T., Kashihara, A. and Toyoda, J. : "A Learning Environment for Knowledge-Structuring in History", Proc.of 6th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International '95) , pp.833-838 (1995) .
2. Hirashima, T., Horiguchi, T., Kashihara, A. and Toyoda, J. : "Error-Visualization by Erroneous-Simulation", Notes of AI-ED '95 Workshop : The Use of Qualitative Reasoning Technique in Interactive Learning Environment, pp.6-9 (1995) .
3. Horiguchi, T., Hirashima, T., Kashihara, A. and Toyoda, J. : "Error-Based Simulation and Its Management Using Qualitative Reasoning Techniques", Notes of ITS '96 Workshop : Simulation-Based Learning Technology, pp.6-10 (1996) .
4. Horiguchi, T., Hirashima, T., Kashihara, A. and Toyoda, J. : "Qualitative Diagnosis of Error-Based Simulation for Error-Visualization", Proc.of ED-MEDIA '96, pp.312-317 (1996) .

C. 研究会・全国大会

1. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "歴史を対象とした知識構造化のための支援環境", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.95, No.14, ET95-1, pp.1-8 (1995) .
2. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "学習者の誤り顕在化のためのシミュレーション環境", 人工知能学会全国大会 (第9回) 論文集, pp.581-584 (1995) .
3. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "学習者の誤りを可視化するためのシミュレーション環境", 教育システム情報学会第20回全国大会講演論文集, pp.153-156 (1995) .
4. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "定性シミュレーションを用いた誤り可視化シミュレーションの制御", 人工知能学会研究会資料, SIG-9501, pp.96-103 (1995) .
5. 平嶋宗, 堀口知也, 小出誠, 柏原昭博, 豊田順一: "力学教育のためのリフレクション環境", 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9503, pp.9-16 (1996) .
6. 平嶋宗, 堀口知也, 柏原昭博, 豊田順一: "問題解決の誤りに対する Cognitive Conflict の生成方法", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.96, No.16, ET96-12, pp.83-90 (1996) .
7. 平嶋宗, 堀口知也, 柏原昭博, 豊田順一: "誤り修正のための内発的動機付け", 人工知能学会研究会資料, SIG-HIDSN-9601, pp.8-13 (1996) .
8. 堀口知也, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "Error-Based Simulation の効果的な演出のための認知的・技術的問題の分析", 教育システム情報学会第21回全国大会講演論文集, pp.297-300 (1996) .

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 歴史の知識構造化を支援する知的教育システムの開発	5
2. 1 緒言	5
2. 2 システムの概要と教授方略	7
2. 2. 1 問題設定	7
2. 2. 2 知識構造化支援手法	8
2. 2. 3 本システムの知識構造化支援による学習効果とその位置付け	11
2. 2. 4 関連研究	13
2. 3 検証	14
2. 3. 1 調査内容	15
2. 3. 2 調査結果	15
2. 4 結言	18
第 3 章 定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御	21
3. 1 緒言	21
3. 2 EBS 制御の枠組み	23
3. 2. 1 EBS による誤り可視化の条件	23
3. 2. 2 EBS-manager の実現手法	27
3. 3 評価実験	33
3. 4 関連研究	35
3. 5 結言	36
第 4 章 EBS の誤り可視化効果に関する諸要因とその構造	39
4. 1 緒言	39
4. 2 EBS の誤り可視化効果を決定する諸要因	40
4. 2. 1 誤り可視化属性	40
4. 2. 2 誤り可視化条件	40

4. 2. 3	誤り可視化状況	41
4. 3	要因同士の競合と EBS の視点	44
4. 3. 1	EBS の誤り可視化効果を決定する要因同士の競合	44
4. 3. 2	EBS の視点の導入	45
4. 4	EBS の設計アルゴリズム	46
4. 4. 1	「EBS の見え方」優先の EBS の設計アルゴリズム	46
4. 4. 2	「EBS の見せ方」優先の EBS の設計アルゴリズム	47
4. 4. 3	統合的な EBS の設計アルゴリズム	48
4. 5	結言	49
第 5 章	結論	51
謝辞		55
参考文献		57

目次

図2. 1	可視化による知識の構造化支援	7
図2. 2	推論による知識の構造化支援(1)	9
図2. 3	推論による知識の構造化支援(2)	11
図3. 1	Error-Based Simulationによる誤り可視化の枠組み	24
図3. 2	力学問題の例題	25
図3. 3	EBS-managerのEBS制御の手続き	28
図3. 4	EBSとNSの間に定性的な差異が生じる区間	30
図3. 5	状態遷移木の分岐	31
図3. 6	パラメータの摂動によって生じる定性的な差異	32
図3. 7	DQ解析の推論過程	33
図3. 8	システム画面	34
図4. 1	滑車にかかる力の問題	41
図4. 2	斜面上のブロックの問題	42
図4. 3	EBS 構成要因の構造	46
図4. 4	「EBS の見え方」優先の EBS 設計アルゴリズム	47
図4. 5	「EBS の見せ方」優先の EBS 設計アルゴリズム	48
図4. 6	統合的な EBS 設計アルゴリズム	49

表目次

表2.1	可視化による知識の構造化の検証	16
表2.2	推論による知識の構造化の検証	16
表2.3	教科書・参考書／教師の教授法	16
表2.4	自習時の学習法	16

第 1 章

序論

人工知能技術の重要な応用分野の一つとして、人間の学習支援に計算機を利用する試みである知的教育システムに関する研究が、従来より活発に行われている。これは 1950 年代に始まった CAI (Computer Assisted Instruction) 研究から 1970 年代に始まる ITS (Intelligent Tutoring System) 研究、さらには 1985 年前後から始まった ILE (Interactive Learning Environment) 研究という多様なパラダイムを生み出し、それに伴って知的教育システム構築のために要求される技術も多様なものになってきた [大槻 93] [大槻 96]。特に、人間の教師の教育的行動を表面的に模倣するに留まる CAI から、システム自身が学習者の知識状態を推定し適切な教育行動を決定する ITS へとパラダイムが移行するにつれて、従来のような制約の大きい言語的媒体によって人間-計算機間で伝達される情報の質と量の制約に起因するシステム性能の限界が問題とされるようになり、人間-計算機間のより高度なコミュニケーション手段の必要性が高まってきた [大槻 88] [大槻 96]。このような知的教育システム研究からの要求から、最近では、マルチメディア技術を積極的に利用して人間とシステムとの自由な相互作用を行わせることにより学習者の発見的学習を促進しようとする ILE の研究が盛んになってきた [大槻 93] [大槻 96] [Devine 96]。これには、近年におけるメディア操作技術の飛躍的な発展という背景の寄与するところも大きい [岡本 95]。

例えば、近年においては、対象ドメインのシミュレーション環境を構成し、マルチメディアによって学習者とシステムの相互作用を実現する ILE の研究が盛んに行われている。このような ILE は、特に物理学に代表されるような定式化された知識の発見的学習に適しており、電子回路の故障診断を対象とする SOPHIE [Brown 82] や蒸気船推進プラント訓練システム STEAMER [Stevens 83]、また力学教育を対象とする ThinkerTools [White 93] を初めとして様々なシステム [植野 93] [渡辺 95] [Asami 96] が開発されている。これらの研究では、従来の制約された言語的媒体に比べ多様な情報を同時的に伝達することのできるマルチメディアの特性を生かして、学習者とシステムの相互作用を実現するためのシミュレーション環境を構成しているところに特徴があり、十分な成果を上げていると言える。

しかしながら、これらの研究には二つの問題点が指摘される。第一の問題点は、これらのシステムにおいては、シミュレーション環境を構成することが可能である定式化された知識を扱う分野しか対象とされておらず、例えば歴史などの宣言的知識や一定の日常業務などの手続き的知識

に代表されるような定式化されない知識を扱う分野に対するシステムはこれまで研究されてこなかったことである。後者のような分野においては、従来より、歴史事象のハイパーテキスト検索システム [加藤 91] [丸山 94] や経営管理のビデオ映像を用いたトレーニングシステム [Bielenberg 96] などが開発されているが、これらはいずれも、あくまでシステムから学習者への情報の提示を、従来の言語的媒体に代わりマルチメディアを用いて行っているに留まり、マルチメディアに期待される可能性の一つである人間-計算機間の高度な相互作用、すなわち双方向のコミュニケーションを指向しているとは言い難い。第二の問題点は、上述の ILE においては、学習者の入力にもマルチメディアを利用するという点で、高度な双方向のコミュニケーションは十分に達成されていると言えるが、システムが提示するマルチメディアが学習者にどのような効果をもたらすかを予め見積もることには重点が置かれていないという問題である。これはマルチメディアの伝達する情報の多様性、およびその受け手としての人間の感覚特性の複雑性の双方に関わる総合的・複合的性格に起因する困難であるが [石塚 93]、知的教育システムにおいてマルチメディアを真に有効に利用するためには、それが学習者に与える効果を適切に診断・制御した上での運用が必要である。

そこで筆者はまず、定式化されない知識の伝達においても、適切なマルチメディア技術を用いることにより人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションが実現され、さらにそれが学習者の知識の構造化に貢献し得るという一つの可能性を示す研究を、歴史を対象として行った。また、マルチメディアが人間に与える影響を適切に定式化することにより、その効果を見積もった運用が可能となることを示す研究を、力学を対象として行った。ただし、ここでのマルチメディアは、いずれも視覚的なものに限定して扱っている。

最初の研究においては、学習者の知識状態を視覚的に表示させることによって知識構造化の支援を目的とするシステムを開発し、その有効性を実験的に検証した。一般に新しい知識を学習する際には、それを既有知識に関係付けて記憶・理解すること、すなわち知識を構造化することが重要であると言われている。そこで筆者の開発したシステムは、一般に知識構造化が自発的には起こりにくく、また定式化が難しいとされる歴史を対象科目として、学習者に自己の知識を記述する可視化ツールを提供することにより、知識の構造化を支援するという機能を実現した。すなわち学習者は自己の知識を外化することにより知識間の関係を明示的に捉えることができ、またシステムにとっても、このように学習者の知識が視覚的に表されることにより、その知識状態を詳細に把握できるという効果もたらされる。さらにシステムは、その可視化ツール上で学習者に適切に制御された説明を与えることによって、学習者が自ら知識間の関係を推論することを促進するため、学習内容がより強固な形で定着するという効果も持つことになる。このようにして、可視化ツールを用いた人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションが実現される。このような考察の下に設計・開発されたシステムを計算機上に実装し、その有効性を実験的に検証し

た。

次の研究においては、学習者の知識のみならずその誤りを可視化することが学習に有効であることを示す研究を行った。一般に問題演習を通じた学習において、誤りの発生は絶好の学習の機会である。この学習機会を有効に利用するためには、学習者が自身の誤りを認識し修正できるような支援が必要であるが、一般にこれは難しいタスクであるとされている。例えば力学の問題において、学習者が誤った運動方程式を立式した場合、その誤りを方程式上で指摘することは必ずしも有効な支援とは言えない。そこで野田らは、力学における立式上の誤りを挙動シミュレーション上に写像し、挙動の「不自然さ」として誤りを可視化する枠組みを提案した。そしてこのような誤りを反映した挙動シミュレーション (Error-Based Simulation: EBS) を生成する機能を計算機上に実装し、幾つかの誤り事例に対してEBSが誤りの認識・修正支援として効果的であることを実験的に確認している [野田 95]。しかしながら、EBSが全ての誤りを効果的に可視化できるわけではなく、そのため、EBSが効果的な誤りの可視化となっているかどうかを診断した上での運用が必要となる。筆者は、EBSが効果的であるためには、正規の挙動シミュレーションとの間に定性的な差異がある必要があると考え、誤りの可視化条件として定式化を行った。その上で、EBSがこのような可視化条件を満たすかどうかを診断する機能を定性推論の技法を用いて実現する手法を提案した。このようにして、挙動シミュレーションという視覚的メディアが学習者に与える効果を見積もった上での運用を実現している。このようなEBSの診断・制御機能を計算機上に実装して、幾つかの誤り事例に対して本手法がEBSの効果的な運用に対して有効であることを実験的に確認した。

さらに、EBSによる誤り可視化の高度化のため、上記の研究の知見に基づいて、EBSの視覚的効果のより詳細な要因の抽出・分析、また新たな視覚的表現方法の導入の検討を行った。これによってEBSの誤り可視化効果を決定する諸要因とその構造が明らかとなり、統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現へ向けての展望を得た。

以下、第2章においては、学習者の知識状態を記述するための適切な可視化ツールを備えたシステムの設計・開発について述べ、それが学習者の知識の構造化を促進し、また人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションの実現を可能にすることを述べる。第3章においては、学習者の誤りを挙動シミュレーション上に写像することによって可視化する枠組みについて概説した上で、それを適切に運用するためにEBSが効果的であるための誤り可視化条件の定式化と、それに基づく診断・制御機能の定性推論技法を用いた実現手法について詳述する。さらにその手法を用いて計算機上に実装したEBSの診断・制御システムの評価実験について述べ、その結果を考察する。第4章では、第3章の知見に基づいてEBSの視覚的効果をより詳細に議論し、EBSの誤り可視化効果を決定する諸要因とその構造を明らかにする。最後に、第5章において本研究の総括を行う。

第2章

歴史の知識構造化を支援する知的教育システムの開発

2.1 緒言

本章においては、定式化されない知識を扱う分野の代表として歴史を取り上げ、適切なマルチメディア技術を用いて人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現するシステムの設計・開発について述べる。また、ここで提案する知識の可視化ツールは、それを実現することができるのみならず、学習者の知識の構造化にも貢献することを示す。

定式化されない知識を扱う分野においては、物理学に代表されるように対象ドメインのシミュレーション環境を構成するという従来より用いられている方法を適用することが難しく、そのため人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションによる教育を実現するためには、独自の工夫が必要となる。しかし従来の知的教育システムにおいては、そのような工夫は充分になされているとは言い難く、計算機固有の諸技術は、あくまで提示される知識を機械的暗記によって学習することを支援するための補助的手段として用いられるに留まっている [杉山 87]。

歴史は、一般にそのような暗記科目の典型と見なされている [杉山 87]。すなわち歴史においては、学習者は通常、主として歴史上の事件名とその年代を個別に記憶しがちであり、それらの事件間の関係はあまり考慮しない場合が多い。しかしながら、本来歴史においては、ある事件が歴史上どのような意味をもっているのかを位置付けることが重要であり、そのためにはそれが他の事件とどのような関係にあるかを理解することが必要となる。さらに、このことは個々の事件を他の事件と深く結びつけることになるため、記憶への定着を良くすることにもなる。

教育においては、単に知識を暗記するだけでなく、学習者が新たに獲得した一連の知識を互いに関係付けて構造化することが、その知識を深く理解し記憶するために不可欠である [西林 94]。しかしながらこのような知識の構造化は、学習者の自発的な作業に任せていたのでは一般に起こりにくい [杉山 87]。そこで知識を伝達する側からの、積極的な支援が必要となる。

そこで本章で述べる研究では、歴史を対象領域に選び、適切な知識の可視化ツールを提供することにより、人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現することによって知識の構造化を支援するシステムを設計・開発した。本システムは、学習者が歴史の知識を互いに関

係付けて獲得することを促進することにより、単に知識を個別的に暗記するだけでなく、それが何を意味するかを理解させ、記憶に定着させることを指向している。具体的には、システムは学習者にいくつかの歴史上の事件を年代順に並べ換える問題を課する。正しい年代順に並べ換えるためには、学習者はそれらの事件間の様々な関係を正しく理解する必要がある。このような問題演習を通して、システムは学習者が歴史の知識を互いに関係付けること、すなわち知識の構造化を支援することができる。

本システムでは知識の構造化を支援するために、(1) 学習者の知識状態をシステム側に取り込んで学習者モデルを構成し、(2) それに基づいた診断によって学習者が知らない関係を同定してその説明を提示するという手順をとる。このような支援を効果的に行うために、「可視化による知識の構造化支援」、および「推論による知識の構造化支援」という手法を用いる。前者は、上記(1)、(2)の手順を視覚的な手段によって行う手法である。つまり、学習者に自己の知識状態を図的に記述させ、またシステムからの説明を学習者に図的な方法で提示する。この手法では、学習者は自己の知識状態を図示することによって既有知識を整理でき、またそのような知識状態の図的な記述は、システムが学習者モデルを構築するのを容易にする。さらに、システムからの説明が図的に提示されることにより、学習者が説明を解釈する際の負担が軽減されるという効果が期待される [西田 94]。本システムではこのような手法を実現するためのグラフィカル・ユーザ・インターフェースを提供している。一方、後者は、上記の手順(2)において知識同士の関係を学習者に説明する際に、その関係を直接教えるのではなく、それらの知識の持つ様々な属性から、その関係を学習者が推論できるように誘導する手法である。この手法では学習者に自ら考えさせるため、獲得される関係が強化されるという効果が期待される [Burton 82] [Fox 91] [Kashihara 94] [VanLehn 92]。

このような手法を用いて歴史の知識の構造化を支援するシステムを計算機上に実装し検証実験を行ったところ、本システムの知識の可視化ツールによる人間-計算機間の高度な双方向コミュニケーションが、歴史のような機械的暗記が行われがちな科目において、充分有効であることが示された。ただしここでの検証は、可視化ツールを用いた上述の2つの知識構造化支援手法の設計理念の妥当性を検証するものであり、学習効果の定量的な測定ではない。したがってこれはあくまでも予備的な検証であることを注記しておく。

以下本章では、2.2節において本システムの概要と教授方略について述べ、さらに本システムにおいて用いた可視化ツールによる知識構造化支援手法の位置付けを行う。また関連研究について言及し、従来開発されてきた歴史教育のためのCAIシステムに比しての、本システムの位置付けについて述べる。2.3節においてはシステムの検証方法について述べ、その結果を分析する。そして最後に2.4節で総括を行い、今後の課題について述べる。

2. 2 システムの概要と教授方略

本節においては、まず本システムを用いて学習者が歴史を学習する手順を説明し、その際に用いる可視化ツールによる2つの知識構造化支援手法について具体的に述べる。次にITSの設計において従来から指摘されているいくつかの課題について述べ、これらに対して本システムで用いた2つの手法に期待される学習効果と、これらの手法の位置付けについて述べる。さらに関連研究について言及し、従来開発されてきた歴史教育のためのCAIシステムに比しての、本システムの位置付けについて述べる。

2. 2. 1 問題設定

本システムは、学習者に歴史上の事件を年代順に並べ換える問題を課し、その問題演習を通して学習者が事件間の様々な関係を理解することを支援する。具体的には、(1) 学習者は提示された問題に対して事件を年代順に並べ換えた解答を作成し、(2) システムはその解答を診断して学習者に教授すべき事件間の関係を同定しその説明の提示を行う。

本システムではこのような学習者－システム間のやりとりを、グラフィカル・ユーザ・インターフェースを介して行う。図2. 1にその画面を示す。学習者はこの可視化ツールを用いて、歴史上の事件をノード、それらの時間順序関係をリンクとする意味ネットワークを構成する。同図では、クレタ文明、ミケーネ文明、ギリシア文化、ローマ文化を時間順序に並べる問題が与えられている。学習者は、時間順序を知っているノード同士を時間順序関係リンク（図では矢印で

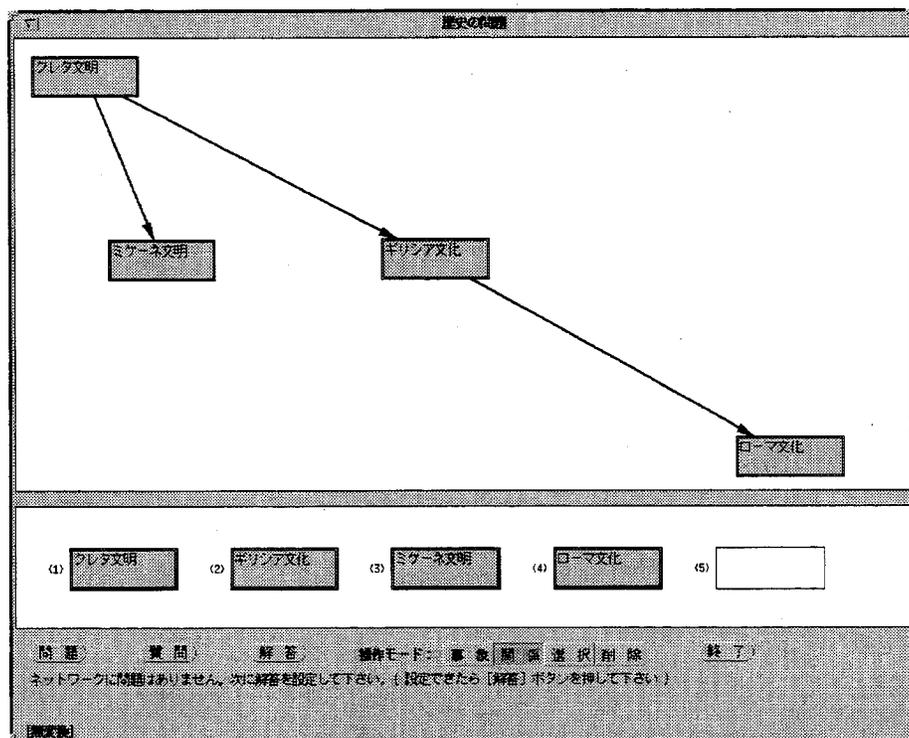


図2. 1 可視化による知識の構造化支援

表されている)によって結合し、意味ネットワークを構成する。そしてこの意味ネットワークに基づいて、各事件を年代順に並べた解答を作成する(図中、下欄に示されている)。

しかしながら、このように線形化された解答のみからでは、システムは学習者の知識状態を正確に把握することができない。例えば同図において、解答ではミケーネ文明がギリシア文化の後にされているが、システムは、学習者が両者の時間順序関係を知っていてこの順序に並べたのかどうかを判断することができない。しかしここで学習者の構成した意味ネットワークを見ると、両者の間には時間順序関係リンクが張られていないため、学習者は両者の時間順序関係を知らず、たまたま解答のような順序に並べたに過ぎないと予想される。このように、システムは学習者の解答のみでなく、意味ネットワークをも参照することによって学習者の知識状態についてより多くの情報を得ることができる。そこでシステムはこの意味ネットワークに基づいて診断を行い、学習者が知らない時間順序関係があれば、それを教授する。

2. 2. 2 知識構造化支援手法

(1) 可視化による知識の構造化支援

図2.1に示すような可視化ツールを用いることによって、学習者は自己の既有知識を確認するだけでなく、自己にとって何が未知であるかをも明らかにすることができる。同図において、学習者はクレタ文明とミケーネ文明、クレタ文明とギリシア文化、ギリシア文化とローマ文化の時間順序関係は知っているが、その他の関係、例えばミケーネ文明とギリシア文化の時間順序関係は知らないことが明らかとなる。このように学習者は意味ネットワークを構成することによって自己の知識を整理することができるため、知識の構造化が促進されると期待される。このことを「可視化による知識の構造化支援」と呼ぶ。

またシステムは、この意味ネットワークを学習者の知識状態を表現するための学習者モデルとして用いることができる。例えば図2.1では、システムは学習者がミケーネ文明とギリシア文化の時間順序関係を知らないので教授する必要があると診断することができる。

ただしここで、可視化による知識の構造化支援の枠組みが適用できるためには、扱う対象となる歴史事象が、その時間順序関係を比較できるようなものでなければならない。本システムでは、意味ネットワークを構成するリンクを、時間順序関係のみに限定しているため、学習対象をそのような歴史事象に限定する必要がある。本来、歴史事象同士の関係には、時間順序関係以外にも、例えば因果関係など、より歴史学の本質をなすような関係が考えられるが、そのような関係は、歴史観の違いによって様々な異なった関係付けが可能である。またそのような場合には、そもそも何を歴史事象として一つの概念とするかについても、解釈によって異なった見解が生じてくる。したがって、学習者の作成した解答の正否を、客観的に診断することが難しくなる。そこで本システムではこのような問題を避けるため、対象とする関係を、その解答の正否を客観的、一意的

に決定し得る時間順序関係のみに、あえて限定して取り扱っている。

(2) 推論による知識の構造化支援

学習者が構成した意味ネットワークを診断することによって、システムは学習者にどの事件間の時間順序関係を教授すべきかを決定する。しかし本システムはこのような関係を直接的に教授することはしない。その代わりにシステムは、対象となる事件の持つ様々な属性から、それらの間の関係を学習者が推論できるように誘導するという教授方略をとる。これを「推論による知識の構造化支援」と呼ぶ。

図2. 2にその具体例を示す。ここでは、システムは学習者にミケーネ文明とギリシア文化の時間順序関係を教授しようとしている。システムは最初に、ミケーネ文明とギリシア文化のそれぞれの属性を学習者に提示し、それらのうち時間順序関係を付けることのできる属性を学習者に選択させる。ここではそれぞれ青銅器文明と鉄器文化とが選択されている(図では太枠によって表されている)。次にシステムは学習者に、選択された属性同士の間時間順序関係を答えさせる。ここでは学習者は鉄器文化は青銅器文明よりも時代が後であると答えている(図では矢印とその方向によって表されている)。最後にシステムは、ミケーネ文明—青銅器文明およびギリシア文化—鉄器文化がそれぞれ主体—属性関係にあり、かつ鉄器文化が青銅器文化よりも時代が後であることを指摘して、学習者にミケーネ文明とギリシア文化の時間順序関係を推論させる。このような誘導によって、学習者はギリシア文化がミケーネ文明よりも時代が後であると判定することがで

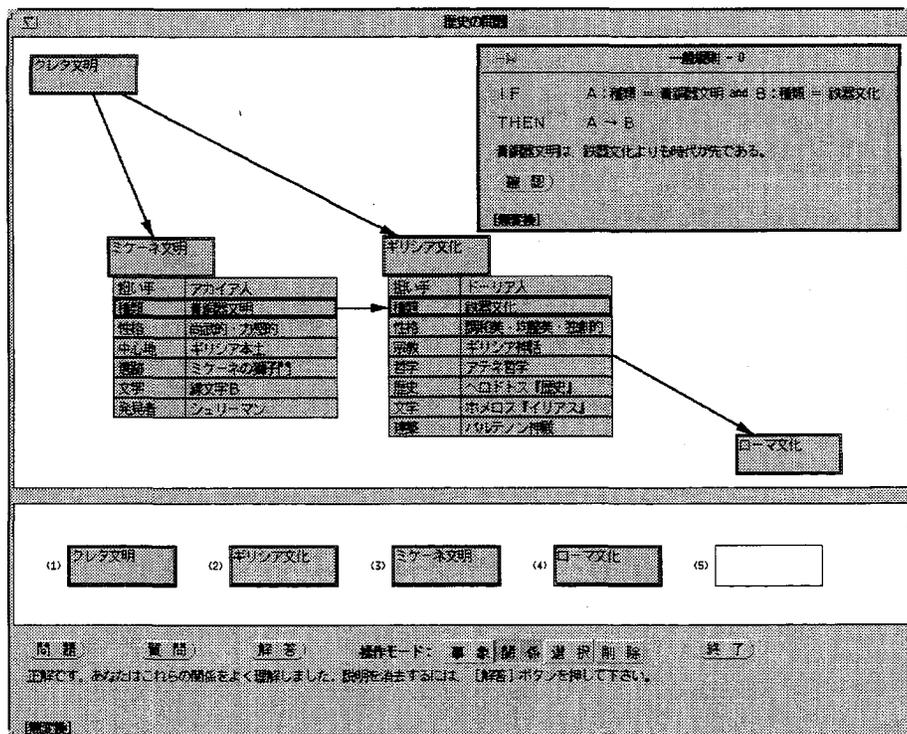


図2. 2 推論による知識の構造化支援 (1)

きる（このとき、属性同士の時間順序関係が主体同士においても保存される、という性質を用いている）。このように、システムは学習者にギリシア文化とミケーネ文明の時間順序関係という教授目標である関係の直接的な説明の代わりに間接的な説明を与えており、このような間接的説明から学習者自身が教授目標である関係を推論することによって導出することを誘導している。このような推論を行うことによって学習者の理解はより深まり、知識が構造化されることが期待される。これが「推論による知識の構造化支援」である。

ただしここで、推論による知識の構造化支援の枠組みが適用できるためには、上述の説明からも明らかなように、扱う対象となる歴史事象は、その時間順序関係を比較できるようなものであり、かつ、それが属性－属性値リストに展開できるような概念である必要がある。そして当該の属性－属性値リストの中に、その時間順序関係をつけることのできる性質を持った属性が含まれているようなものでなければならない。本システムでは、歴史事象間の関係として、時間順序関係のみを扱っているため、主体同士の時間順序関係を、その属性同士の時間順序関係に置き換えて考えることが可能となっている。

本手法を効果的に運用するためには、学習者の既有知識を同定することが重要となる。例えば図2.2において、システムの説明が学習者に受け入れられるためには、学習者にとって青銅器文明と鉄器文化との時間順序関係が既知であるか、あるいは常識的に誰もが持っている一般法則から容易にそれらの時間順序関係が導出できなければならない。注目した属性が学習者の既有知識や常識的一般法則に結びつかないとき（すなわちそれらの属性間の時間順序関係を学習者が知らず、またそれを判定できる常識的一般法則を持たないとき）、本システムはその属性を主体としてさらにその属性を提示して、時間順序関係を付けるために注目すべき属性を学習者に選択させる。そして学習者の既有知識や常識的一般法則によって時間順序関係を判定できるレベルに到るまで、この属性提示を繰り返す、という戦略をとる。例えば図2.3においては、クレタ文明とミケーネ文明との時間順序関係を考えるため、最初にそれらの担い手であるクレタ人とアカイア人に注目している。ここで学習者がクレタ人とアカイア人の時間順序関係を知っていれば、説明はこのレベルで打ち切られるが、同図では学習者はこれを知らず、間違った時間順序関係を答えている。そこでシステムはさらにクレタ人とアカイア人の属性を提示して、注目すべき属性を学習者に選択させている。ここで学習者は、クレタ人の被征服民族がアカイア人であり、またアカイア人の征服民族がクレタ人であることに注目している。これらの属性に注目すれば、学習者はクレタ人とアカイア人についての既有知識を持たなくても、「征服民族は被征服民族よりも時代が後である」という常識的な一般法則によって、両者の時間順序関係を判定することができる。このように、本手法では目標関係を推論させるために学習者の既有知識や常識的一般法則を利用するため、学習者がどんな既有知識や常識的一般法則を持っているかについての情報が不可欠であり、適切な学習者モデルを構成する必要がある。それによってシステムは、どのレベルでの説明

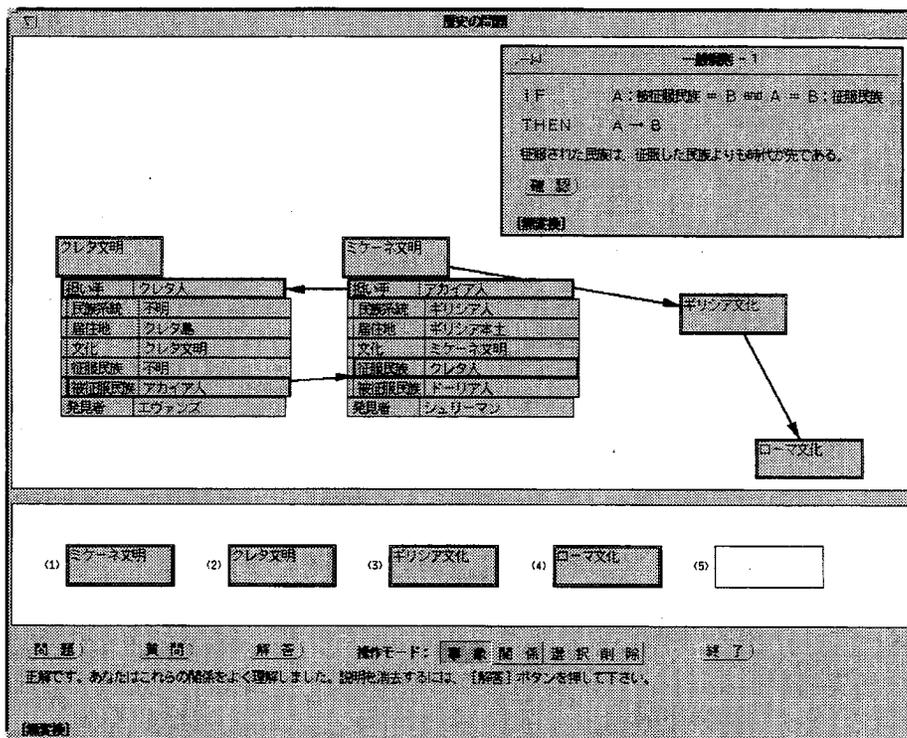


図 2. 3 推論による知識の構造化支援 (2)

を学習者に与えるかを決定することができる。

さらにシステムが「推論による知識の構造化支援」を用いる際に、次の2つの方法を使い分けることを現在検討中である。すなわち、1つは学習者が目標関係を知らない場合、それについての間接的な説明を与えて教授目標である関係を推論によって導出させる方法(これを知識のcompileと呼ぶ)、もう1つは学習者が教授目標である関係を知っている場合、それについての間接的な説明を行わせて既有知識を強化する方法(これを知識のde-compileと呼ぶ)である。これらの方法を学習者の状態に合わせて適宜使い分けることにより、知識の構造化を効果的に促進することができると思われる。

2. 2. 3 本システムの知識構造化支援による学習効果とその位置付け

ここでは、ITSの設計において従来から指摘されているいくつかの課題について述べ、それらに対して本システムで用いた可視化ツールによる2つの知識構造化支援手法に期待される学習効果とこれらの位置付けについて述べる。

(1) 「可視化による知識の構造化支援」の学習効果と位置付け

ITSの設計において指摘されている問題点の1つに、従来のシステムにおける穴埋め式や選択式などの特殊な形式に制限された入力環境では、学習者はその意図をシステムへ充分伝達することができないということがある [大槻 88]。学習者の意図や思考過程をシステムに伝達すること

は、システムが学習者の状態を把握し適切な教授行動をとるために不可欠な機能であり、従来より自然言語、あるいはキーワードによる疑似自然言語による入力方式などが研究されてきた。しかしながらこのような自然言語による入力は一般に煩雑になり、学習者に少なからぬ負荷をかけることになるため、学習者の思考が阻害されるという悪影響が発生することになる。そこで学習者の思考を阻害することなく、かつシステムによる診断に十分な情報を提供することのできるように、適切なレベルにおいて学習者の意図や思考過程を表現する記述言語の必要性が指摘され [Self 94]、そのような試みがいくつか提案されている [石本 94] [Twidale 91]。

本研究では、このような試みの1つとして、グラフィカル・ユーザ・インターフェースを用いた意味ネットワーク構築環境を提案した。このような可視化ツールを用いれば、学習者は思考を阻害する要因となるような負荷を受けることなく自己の知識状態を記述することができ、またその記述は意味ネットワークで表現されているため、システム側が取り込むのに適している。さらに意味ネットワークの特徴である、豊かな表現力・汎用性などの利点を生かすことができるため、システム－学習者間の高度な双方向のコミュニケーションを可能にすることができる。また、自己の知識状態を図的に記述することが人間の認知にとって良い影響を与えることは従来から指摘されている [西田 94]。すなわち学習者は可視化ツールによって意味ネットワークを構成することで、自己の既有知識のみならず、自己にとって何が未知であるかをも確認することができ、自発的な知識の構造化が促進されることが期待される。

また本システムでは、学習者からの入力の可視化のみならず、システム側からの説明をも図的な方法で提示している。このことによって学習者は、テキスト形式の説明を与えられる場合に比べて、説明のわかりにくさ等の学習の阻害要因となる負荷を受けることを免れ、より容易に説明を受け入れることができると期待される。

したがって「可視化による知識の構造化支援」とは、システム－学習者間の双方向の知識伝達を円滑かつ充分に行うことを支援し、さらに図示することによって学習者の自発的な知識の構造化を促進するための一手法として位置付けることができる。

(2) 「推論による知識の構造化支援」の学習効果と位置付け

ある一連の知識を記憶する際、それらを互いに無関係なものとして学習するよりも、意味的に関係付けて学習するときの方が知識の定着が良く、また大量に記憶できることは良く知られている。また互いに無関係な対象でも、それらを意味的に関係付けるようにして学習すれば、意味付けをするための知識の分だけ学習量が増加するにもかかわらず、効果的に学習することができる。従ってどのような学習対象にせよ、意味的に関係付けるように、すなわち対象間に妥当性を付け加えるようにして学習することが記憶にとって重要である [西林 94]。しかしながらある種の科目においては、学習者は大量の学習対象を機械的に暗記するという方法（すなわち意味的に無関

係なものとしての学習)をしばしば用いがちである。歴史においては、歴史上の事件名とその年代を、他の事件と関係付けることなく暗記することなどがこれにあたる。

本システムは、学習者に歴史上の事件の時間順序関係を教授する際、単にその年代に対応させて暗記させるのではなく、学習者がその事件同士を意味的に関係付け、妥当性を持ったものとして記憶することを促進する。例えば図2.2においては、目標関係であるミケーネ文明とギリシア文化の関係を、学習者の既有知識である青銅器文明と鉄器文化の関係に結びつけることによって妥当性を付け加えている。このとき、学習対象は意味付けするための知識(ミケーネ文明-青銅器文明およびギリシア文化-鉄器文化の主体-属性関係)の分だけ増加しているが、これは記憶にとって障害にはならないことは西林によって指摘されている [西林 94]。むしろ、ミケーネ文明とギリシア文化の関係を青銅器文明と鉄器文化の関係に対応付けて記憶することで、既有知識である銅器文明と鉄器文化の関係自身も強化されるという効果が現れると考えられる。また、本システムは学習者が自らの推論によって学習対象に妥当性を付け加えることを促しているが、このような学習者の積極的な思考を促すような適度な負荷を与えることによって知識の定着が良くなることは VanLehn らによって指摘されている [Burton 82] [Fox 91] [Kashihara 94] [VanLehn 92]。

したがって「推論による知識の構造化支援」とは、学習対象と学習者の既有知識とを結びつけるための知識を手がかりとして与えて学習対象を意味的に関係付けることを支援し、またそのような心的作業を学習者自らの推論によって行わせることで適度な負荷を与えて知識の定着を図ることにより、知識の構造化を促進するための一手法として位置付けることができる。

2. 2. 4 関連研究

ここでは本研究に関連する研究として、従来開発されてきたいくつかの歴史教育のためのCAIシステムについて触れ、それらと比較することによって、本システムがどのように位置付けられるかについて述べる。

杉山らは、中学生の歴史学習がしばしば単なる暗記学習に陥りがちであることを指摘し、歴史学習においては、歴史事象間の関係を有機的に把握する学習技能を育成することが重要であることを示した [杉山 87]。そしてこのような学習を実現するために、歴史資料の効率的な検索を支援する、様々なハイパー・メディア教材が研究・開発されてきた [宇佐美 88] [加藤 91] [丸山 94]。また波多野らは、システムに推論機能を持たせることにより、単に従来のハイパー・メディアのように固定されたリンクをたどるのではなく、学習者に必要な情報を適宜システムが推論して提示するシステムを設計・開発した [波多野 87]。このシステムではデータ構造に柔軟性を持たせることによって、より柔軟な検索が可能となり、またより複雑な知識を扱えるようになっている。

これらはいずれも学習者に比較的大きな自由度を与えているため、学生は興味を引かれる事項

を次々に調べることができ、良い動機づけの下で学習を進めることができる。反面、当初の学習目標を見失わないよう、人間の教師が指導してやる必要がある。すなわち、これらは情報検索ツールとしての性格が強く、システム自身は学習進行のための制御はあまり行わない。所定の学習目標である知識は、学生が自由な検索をしているうちに自発的に形成されるのに任せるという方針を採っている。

これに対して本システムは、システムの教授機能を重視し、システム主導による学習を指向している。すなわち学習者は、システム（設計者）によって明示的に設定された知識構造を形成すべく、システムによる制御の下で学習を進めていく。したがって本システムでは、学習者は自由な情報検索は許されていないが、反面、所定のカリキュラムに従って一定の学習目標をこなしていくという場面には適していると思われる。このように、文献検索ツールとしての従来のシステムと、本システムとは、それぞれに長所、短所を持っており、学習者にどのくらいの自由度を与えるかについては、両者の間にはトレードオフがある。したがって、システムを設計する際には、それがどういう使われ方をするのかを見極めてシステムの目標とするところを決定し、実際に即した機能を達成するように考えていく必要があると思われる。

2. 3 検証

前節において説明した可視化ツールによる2つの教授方略を用いて歴史の知識の構造化を支援するシステムを、Sun SPARCstation10上に実装した。そしてこれらの手法の有効性を検証するため、10名の大学院生を被験者として本システムを試用して貰い、アンケート調査を行った。本システムは学校における歴史教育を想定しているため、本来、中・高校生を被験者に選ぶことが望ましいが、ここでの被験者である大学院生はいずれも工学部の学生であり、事前に予備調査を行って、全員が高校の授業以来、歴史を特別に勉強した経験がないように選んでいる。したがって、歴史の知識と学習法とに関する限り、彼らは中・高校生と比較してもそれほど差異はなく、妥当な学習者像であると見なすことができる。ただし、今後より実用的なシステムを指向して、実際の学習効果を定量的に測定する比較実験を行うに当たっては、一般的な学習者像として、中・高校生を被験者に選ぶ必要がある。

また、ここで実装したのは、意味ネットワーク構築ツールおよび属性提示・選択・関係付けツールなどに限られている。具体的には、学習者は提示された各歴史事象を時間リンクで結ぶことによって自己の既有知識を記述することができ、システムは記述された意味ネットワークを診断して不足している時間リンクを同定することができる。また、システムは教授対象となる歴史事象間の時間関係を、それらの属性リストを提示して学習者に関係付けの手がかりとなる属性の選択・時間順序付けを促すことによって教授する。これはすなわち、「可視化による知識の構造化支援」、「推論による知識の構造化支援」の最も基本的な機能であり、2. 2. 2節(2)で述べたよう

な、学習者の既有知識同定機構やそれに基づく知識のcompile/de-compileの使い分け機構などは実装されていない。したがって、実験に用いたシステムは、あくまでも「可視化による知識の構造化支援」、「推論による知識の構造化支援」の設計理念の妥当性を検証するためのものである。

2. 3. 1 調査内容

アンケートにおいては、次のような質問を設定して、回答を求めた。

- (1) 本システムの可視化ツールは、歴史の知識を理解するのに役立つか。
- (2) 本システムの可視化ツールは、歴史の知識を記憶するのに役立つか。
- (3) 歴史上の事件間の関係をそれらの属性に置き換えて説明することは、その関係の理解に役立つか。
- (4) 歴史上の事件間の関係をそれらの属性に置き換えて説明することは、その関係の記憶に役立つか。
- (5) 従来の歴史の教科書／教師は本システムのような事件間の関係の説明を用いていたか。
- (6) 従来、歴史を自習するとき、本システムのような事件間の関係の説明を用いたか。

(1)～(4)は、本システムにおいて用いた可視化ツールによる2つの知識の構造化支援手法の有効性を検証するための質問である。ここでの「理解」、「記憶」という語は、被験者が主観的に(事件間の関係が)「わかった」、「記憶できた」と感じたか否か、という意味で捉えるようにと予め説明している。(5)、(6)は、本研究の手法との比較のため、従来の学校教育において歴史がどのように教えられていたかを調査するための質問である。それぞれ、本システムのような教育法を行っていた歴史の教科書／教師がどのくらいあったか、また歴史を自習する際、本システムのような方法を用いたかどうかを質問した。ここで学校教育と学習者の自習とを区別したのは、前者によって奨励される学習法が、必ずしも後者の方法と一致するとは限らないと考えたためである。

2. 3. 2 調査結果

アンケートの結果を表2.1～表2.4に示す。表2.1では、9名の被験者が、「可視化による知識の構造化支援」が歴史の知識の理解に役立つと回答し、7名の被験者が、「可視化による知識の構造化支援」が歴史の知識の記憶に役立つと回答している。回答を保留した被験者が若干名いたが、「可視化による知識の構造化支援」の有効性を否定する者はいなかった。有効性を認めた被験者のコメントには、「自己の知識の曖昧な部分がはっきりする」、「図的な表現は人間の認知にとって自然な理解・記憶法である」など「可視化による知識の構造化支援」の設計理念を裏付けるものが多くみられた。また回答を保留した被験者の代表的なコメントは、「意味ネットワークのノード数が多くなると煩雑になって全体を把握しにくい」というものであったが、これは一時に

表 2. 1 可視化による知識の構造化の検証

	大変役立つ	役立つ	役立たない	全然 役立たない	何とも 言えない
知識の理解	2	7	0	0	1
知識の記憶	2	5	0	0	3

表 2. 2 推論による知識の構造化の検証

	大変役立つ	役立つ	場合によっ ては役立つ	役立たない	全然 役立たない	何とも 言えない
関係の理解	3	7	0	0	0	0
関係の記憶	2	3	5	0	0	0

表 2. 3 教科書・参考書／教師の教授法

	数多くあり	少しあり	トピックに よっては あり	殆どなし	全然なし	その他 (無回答)
教科書 参考書	1	1	2	2	2	2
人間の教師	1	0	5	2	0	2

表 2. 4 自習時の学習法

常に用いた	場合によっ ては用いた	用いな かった	その他
0	6	4	0

提示される情報の量が多ければ、図的な表現に限らずどのような表現法でも共通に起こる問題である。解決策としては、情報量に応じて表現手段を使い分ける、あるいは大量の情報を扱うときにはセグメンテーションを行い、一時に提示する情報量を調整する、などが考えられる。本システムにおいては後者の方法をとることで(すなわち学習内容を複数の単元に分けることになる)、この問題は比較的容易に解決可能であると思われる。ここで本システムは厳密なカリキュラムに従うことを想定しているため、単元に分けることによる学習者の混乱は起こらないものとする。

表2. 2では、ほぼ全員の被験者が、「推論による知識の構造化支援」の有効性を認めている。表中、「場合によっては記憶に役立つ」と回答した被験者のコメントの代表的なものは、「推論に用いた属性が学習者にとってどれだけ記憶しやすいかで効果が左右される」というものであった。これは前章で議論したように、「推論による知識の構造化支援」が有効であるためには、事件間の関係の説明に用いる知識が学習者にとってできるだけ既有知識に近いものであることが必要であることを意味しており、「推論による知識の構造化支援」の設計理念を裏付けている。このことから、「推論による知識の構造化支援」を効果的に運用するためには、学習者の既有知識を同定して適切な学習者モデルを構成することが重要であることがわかる。

表2. 3では、歴史の教科書／教師共、本システムのような教育法を行っていたかどうかの回答にばらつきがあり、一定の傾向がみられない。この原因は次のように推察される。すなわち教師の側では、少なくともトピックによっては本システムのような教育法を行う意図があったが、それが実際の教科書や授業の場で明示的な方法で行われなかったために、学習者によって受け取り方が異なったのであると思われる。つまり教師側の非明示的な意図を汲み取る学習者もいるが、そうでない学習者もいるということである。このことはまた、表2. 4において本システムのような学習法を用いなかった被験者が10名中4名にもものぼることをも説明している。たとえ教師側が奨励する学習法が本システムのような方法を指向していたとしても、それが非明示的な形で伝えられなかったため、その意図を汲み取ることができない学習者は、機械的な暗記に頼らざるを得なかったのだと考えられる。これに対して本システムはこのような学習法を明示的な形で学習者に提示するため、学習者に効果的な学習法を伝えるという意味での意義も大きいといえる。

以上の結果をまとめると、本システムにおいて用いた可視化ツールによる2つの知識の構造化支援手法はいずれも、学習量を適切に調整し、適切な学習者モデルと共に用いるならば、十分に有効であるといえる。また本システムはその学習法を明示的な形で学習者に提示するため、従来学習者に効果的な学習法を伝えることが困難であった歴史のような「暗記科目」において特に有効であると考えられる。ただし学習法の伝達が実際によく行われているかどうかについては、現段階では推察の域をでないため、今後、検証実験を行う必要がある。

2. 4 結言

本章においては、定式化されない知識を扱う分野の代表として歴史を取り上げ、適切なマルチメディア技術を用いて人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現するシステムの設計・開発について述べた。また、ここで提案する知識の可視化ツールは、それを実現することができるのみならず、学習者の知識の構造化にも貢献することをも示した。

一連の知識を学習する際には、それらを互いに関係付けて知識を構造化することが、その知識を深く理解し記憶するために重要である [西林 94]。しかしながら、歴史のようないわゆる暗記科目においては、学習者が自発的にそのような作業をすることは一般に難しいとされている [杉山 87]。本システムは適切な可視化ツールを提供することにより人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現し、これを支援することができる。本章ではまた、そこで用いられる2つの知識構造化支援手法について予想される効果を分析し、これらの手法の位置付けを行った。さらにこれらの手法の有効性を検証するためのアンケート調査を行って予想された効果が得られるであろうとのコメントを得、これらが知識の構造化を支援するために充分妥当な手法であることを示した。

今後の課題としては、第一に本システムへの詳細な学習者モデル構築機構の追加が挙げられる。2.2節でも述べたように、「推論による知識の構造化支援」を効果的に運用するためには学習者の既有知識を同定する必要がある。システムが学習者にどういう説明を与えるかは、学習者の既有知識に依存しているため、その同定機構は不可欠である。またそのような機能が備わって初めて、知識の compile / de-compile の手法を使い分けることができ、より有効な知識構造化支援が実現できる。第二には、本システムで用いた2つの知識構造化支援手法「可視化による知識の構造化支援」、「推論による知識の構造化支援」の有効性を実験的に検証することが挙げられる。本研究ではこれらの有効性の検証方法としてアンケート調査を用いた。しかしこのような方法では一般的な傾向としての妥当性は確認できるが、それが実際に学習効果を上げるかどうかについての判断はできない。そのためには比較実験による検証が不可欠である。またそのような検証実験を行うことによって、システムの教授方略をより詳細に設計する上での指針を得ることができる。厳密な検証実験を行うためには、これらの知識構造化支援手法を分析してより詳細なファクターを抽出し、それぞれのファクターが学習者の認知にどのような影響を及ぼすかを詳細に検討する必要がある。その上で各ファクター間の量的関係を仮説として提出し、実験によって検証していくことが望ましい。そのような知見を得て初めて、学習者に与える負荷を制御した運用が実現可能になる [Kashihara 94]。最後に、学習者にメタ知識を獲得させる機能の検討が挙げられる。2.3節で述べた検証結果から推察されるように、本システムは単に学習対象となる知識の構造化を支援するだけでなく、その学習方法というメタ知識を学習者に獲得させるという効果もあると考えられる。この点を検証実験によって確認し、さらに推し進めて知識構造化におけるメタ知識の

分類を行い、それらの効果的な教授法についての検討も行っていく方針である。

第 3 章

定性推論技法を用いた誤り可視化シミュレーションの制御

3. 1 緒言

本章においては、力学における挙動シミュレーションの分野を取り上げ、それが学習者に与える効果を適切に定式化することによってマルチメディアが人間に与える影響を見積もった上での運用が可能になることを示し、またそのための診断・制御機構の設計・開発について述べる。まず初めに、力学における立式上の誤りを挙動シミュレーション上に反映する誤り可視化シミュレーションの枠組みと意義について述べ、次にそれが学習者にとって効果的であるための条件を誤り可視化条件として定式化し、それに基づいて誤り可視化シミュレーションを診断・制御するための定性推論技法を用いた手法について述べる。また、その手法を用いて計算機上に実装されたシステムを用いた検証実験についても述べる。

一般に、問題解決における学習者の誤答を修正するためには、それが誤りであることを認識させることがまず重要となる [Laurillard 93] [VanLehn 88]。野田らは、一般に人間が形式的な世界での制約違反よりも具体的な世界での制約違反に敏感であることに注目し [Resnick 82]、力学の問題における学習者の立式上の誤りを挙動シミュレーション上に反映させることによって誤りの可視化を図る枠組みと、その実現手法を提案した [野田 95] [Hirashima 95]。そこでは力学系を構成する要素であるオブジェクトの不自然な振舞いにより、誤った運動方程式に含まれる制約違反が可視化される。野田らは誤りを反映したこのような挙動シミュレーション (Error-Based Simulation: 以下 EBS と呼ぶ) を生成する機構 (EBS-generator と呼ぶ) を計算機上に実装し、実験を通していくつかの誤り事例に対するその有効性を確認した [野田 95] [Hirashima 95]。

しかしながら、誤りの可視化に対して EBS が常に効果的であるとは限らない。例えば、正しくは加速度 g で落下すべき物体が加速度 g で上昇しているような場合には、学習者はその振舞いが誤りであることを容易に認識することができるが、それが倍の加速度 $2g$ で落下しているような場合には、多くの学習者にとってその振舞いが誤りであることを認識することは困難である。この

ような場合にEBSを提示することは、誤りの可視化に必ずしも効果的であるとはいえず、逆に学習者を混乱させることにもなりかねない。ここで前者は正しい運動方程式に基づく挙動シミュレーション (Normal Simulation: 以下NSと呼ぶ) との間に定性的な差異を含んでいるのに対して、後者は定量的な差異しか含んでいない。筆者はこの事実に注目し、EBSが誤りの可視化に対して効果的であるためには、EBSがNSとの間に定量的な差異のみならず定性的な差異をも含んでいることが必要であるとの仮定をおき、両者が定性的な差異を示すか否かを診断した上での運用を試みた。

ここで「定性的な差異」というのは、人工知能技術における定性推論の分野において通常用いられている意味に準拠している。定性推論とは、一般に連続量の上で定義される物理系の振舞いを離散的な記号系の上で取り扱うために開発された技法であり、通常の数値的な定量計算に比べて、対象のすべての可能な挙動が効率的に予測できる、不完全なモデルやデータに適用できる、などの利点を持つ。連続量を離散化する基本的な考え方は、ある閾値を設けてそれよりも大きな量と小さな量とを区別するということであり、一般に有限個の閾値を用いて物理系の状態変数を有限個の开区間の集合に分割するという方法が用いられている。そのような閾値は"境界標"、またそのようにして離散化された値は"定性値"と呼ばれる。例えば閾値として"0"をとった場合、状態変数 x は次のような定性値 $[x]$ に離散化される。

$$[x] = \begin{array}{ll} \text{"正"} & (x > 0 \text{ のとき}) \\ \text{"0"} & (x = 0 \text{ のとき}) \\ \text{"負"} & (x < 0 \text{ のとき}) \end{array}$$

すなわち上記の「定性的な差異」というのは、2つの状態変数の値が異なる开区間にあるときの差異であり、「定量的な差異」というのは、それらが同じ开区間にあるときの差異を指している。また、ここで境界標を人間にとって意味のある値に設定することにより、予測される物理系の振舞いを人間にとって意味のある状態遷移の連鎖とすることができる。例えば、対象とする状態変数が速度であるとき境界標として"0"を設定すると、定性推論においては、ある速度 v が $2v$ に変化した場合 (すなわち運動の方向は一定で速さのみが変化した場合: 定量的変化) には定性的な振舞いには変化がないと予測されるが、ある速度 v が $-v$ に変化した場合 (すなわち運動の方向が変化した場合: 定性的変化) には定性的な振舞いに変化が生じたものとして予測される。これは人間の直観ともよく合致している。すなわち定性推論とは、通常の数値的な定量計算に対して、人間にとって意味のある物理系の振舞いを導出するのに適した技法として位置付けることができる。

本章では、前述のようなEBSの診断および提示を制御するための枠組みと、それを定性推論の技法を用いて実現する手法を提案する。ここで筆者は、EBSが誤りの可視化に対して効果的であるためには、NSとの間に力学系を構成するオブジェクトの"速度"あるいは何らかのパラメータ

変化に対する"速度の変化率"^[*1]において定性的な差異を含んでいる必要があるとの仮定をおいている。この仮定に基づいてEBSの診断・制御を行うモジュールをEBS-managerと呼び、その診断・制御の手続きは次の2つのフェーズに分けられている。まず第1のフェーズでは、EBS-managerは定性シミュレーション [Kuipers 86] [Kuipers 94] の技法を用いてEBSおよびNSの定性的振舞いを導出し、両者の比較を行う。両者の間に定性的な差異が発見されるならば、EBS-managerはそのEBSは誤りの可視化に対して効果的であると判断し、それを学習者に提示する。両者の間に定性的な差異が発見されなければ第2のフェーズに移行し、EBS-managerは比較解析 [Weld 88] [Weld 90b] の技法を用いて、その摂動がEBSおよびNSの挙動の変化率の間に定性的な差を生ぜしめるような系のパラメータがあるかどうかを調べる。そのようなパラメータが発見されるならば、EBS-managerはその摂動に伴う系の挙動の変化率が誤りの可視化に対して効果的であると判断し、そのパラメータ摂動を伴うEBSを学習者に提示する。そのようなパラメータが発見されない場合には、EBS-managerはEBSは誤りの可視化に対して効果的ではないと判断する。

筆者はこのようなEBS-managerを計算機上に実装し、その予備的な評価実験を行った。以下本章では、3.2節において従来のEBS-generatorのみによるEBSの運用法の問題点を指摘し、EBSの診断および提示を制御するEBS-managerの必要性とその枠組み、およびその実現手法について述べる。3.3節においては、実装されたEBS-managerによるEBSの有効性の予備的な評価実験について述べ、その結果を考察する。3.4節においては、関連研究との比較を通して誤り認識・修正支援における誤り可視化手法の役割について展望する。最後に3.5節において総括を行う。

3. 2 EBS 制御の枠組み

3. 2. 1 EBS による誤り可視化の条件

図3.1に、EBSによる誤り可視化の枠組みを示す。EBSは、運動方程式中の誤りを方程式世界から挙動シミュレーション世界へとマッピングすることによって生成される。すなわちEBSは、力学系を構成するオブジェクトの不自然な振舞いを提示し、NSによる自然な振舞いとの違いとして誤りを可視化する。そしてこのような誤りの可視化が学習者の誤り認識を促進し、誤り修正のための有益な情報を提供することが期待される。

従来のEBS-generatorによるEBSの生成手法は次の通りである [野田 95] [Hirashima 95]。初めにEBS-generatorは、誤りを含む運動方程式が対象としているオブジェクトを特定し、そのオブジェクトを誤りを反映する対象とする(これを対象オブジェクトと呼ぶ)。次にそのオブジェクトの速度あるいは加速度を、誤りを反映する対象属性として選択する。最後に選択された対象属性

[*1] ここでの"速度の変化率"は必ずしも時間に対する変化率(=加速度)のみを意味せず、時間をも含めた力学系の任意の可変パラメータに対する変化率を指している。

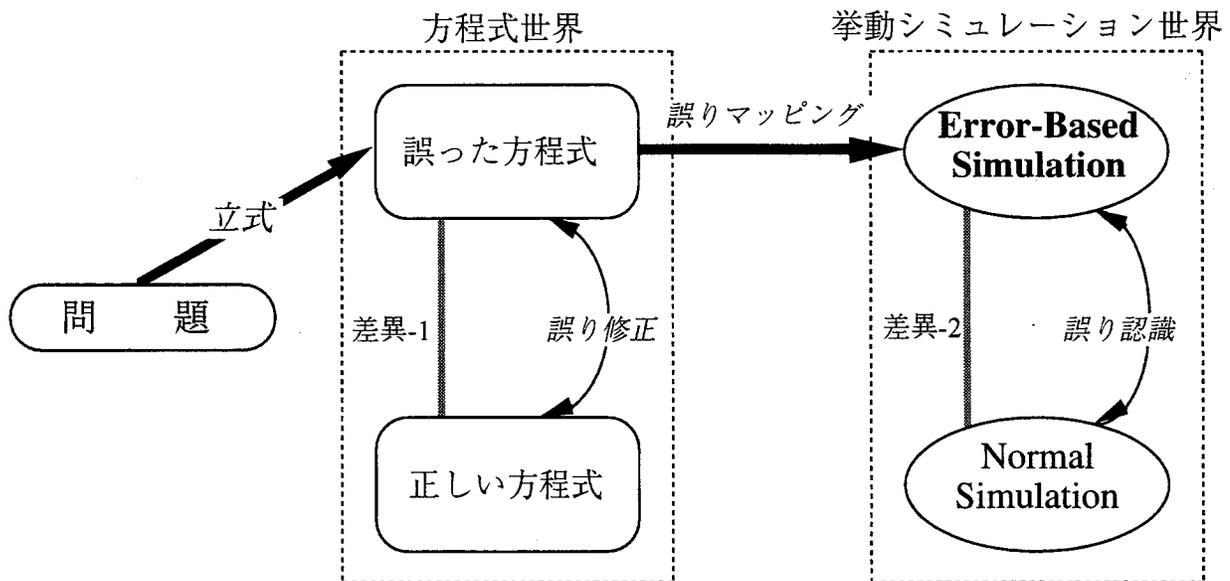


図 3. 1 Error-Based Simulationによる誤り可視化の枠組み

の値を誤った運動方程式に基づいて計算し、その他の全ての属性の値は正しい運動方程式に基づいて計算して、系の挙動シミュレーションを生成する。これがEBSであり、運動方程式中の誤りは、系の特定のオブジェクトの速度あるいは加速度における誤った値での運動として可視化される。すなわち学習者はその運動を、オブジェクトの不自然な振舞いとして認識することになる。図3. 2を用いてEBSの例を示す。いま斜面上に置かれたブロックの運動方程式として、学習者が式(B)のような誤答を生成したとする。このとき生成されるEBSにおいてはブロックが斜面に沿って上昇するという振舞いが現れ、正しい式(A)に基づくNSにおけるブロックが斜面に沿って下降するという振舞いとは明らかな差異を示す。このようなブロックの不自然な振舞いを観察することによって学習者はその挙動シミュレーションが誤りであると判断し、結局式(B)は誤りであることを認識することができる[*2]。

このように、この手法はEBSとNSとの間に生じる対象オブジェクトの振舞いの差異によって誤りの可視化を図るものであるが、その差異を学習者が常に認識できるとは限らない。また場合によっては学習者がどちらの振舞いが正しいかを判断することが困難なことがある。このような場合にEBSを提示することは十分な誤り可視化の効果が得られないばかりか、逆に学習者を混乱させることにもなりかねない。例えば図3. 2の例において学習者が式(C)のような誤答を生成したとき、上述の手法によって生成されたEBSではせいぜいブロックが斜面に沿って正常時とはやや異なる速度で下降するという振舞いが現れるに留まるため、正しい式(A)に基づくNSとの識別が困難である。したがって学習者はどちらの振舞いが正しいかを判断することができず、所

[*2] ただし、この手法が適用できる力学の問題および誤答例の範囲には一定の制約がある。具体的には、EBSの生成条件として、誤った式の両辺の次元が一致していること、誤りとそのオブジェクトの「速度」または「加速度」に反映されること、などが設定されている [野田 95] [Hirashima 95]。

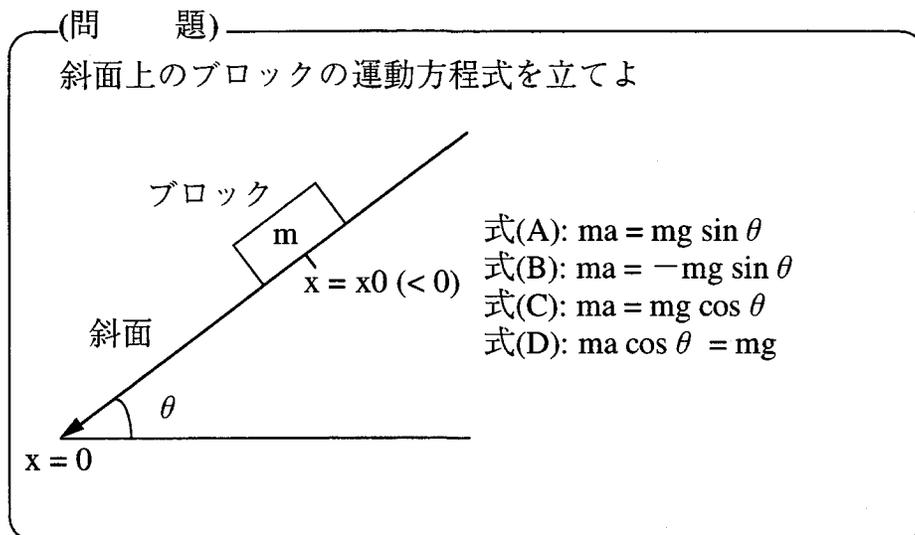


図 3. 2 力学問題の例題

望の誤り可視化の効果が得られない。すなわちこのような場合にEBSを提示することは、誤り認識・修正支援にとって不適切であるといえる。そこでEBSとNSとの間に生じる差異が十分な誤り可視化効果を持つものであるかどうかを判断する基準が必要となる。図3.2の式(B)および式(C)それぞれにおけるEBSを比較した場合、その相違は前者がNSとの間に定性的な差異を含んでいるのに対して後者は定量的な差異しか含んでいないことである。筆者はこのことに注目して、「EBSが十分な誤り可視化効果を持つかどうかは、それがNSとの間に定性的な差異を含んでいるかどうかによる」と仮定し、これをEBSにおける誤り可視化効果の判断基準としている。

このような判断基準によると、図3.2の例において式(C)に基づいて生成されたEBSは、そのままではNSとの間に定性的な差異を含んでいないため、十分な誤り可視化効果を持たないといえる。しかしここで例えば斜面の傾斜角 θ に摂動を加えてやると、式(C)に基づくEBSでは θ の増加に伴ってブロックの下降速度が減少するという挙動変化が現れる。これは明らかに不自然な挙動変化であり、正しい式(A)に基づくNSにおいて θ の増加に伴いブロックの下降速度が増加するという挙動変化に対して、速度の変化率において定性的な差異を示している。このような工夫により、EBSとNSの間に定性的な差異を作り出すことが可能となる場合がある。これはすなわち、系に摂動を加えて以前にはなかった「挙動変化の定性的な差異」を作り出すことにより、EBSが上記の判断基準を満たすものになり得ることを意味している。しかし例えば式(D)に基づくEBSでは、正常時と同じく θ の増加に伴いブロックの下降速度が増加するため、NSとの間に定性的な差異を示す挙動変化は現れない。これは系に摂動を加えても「挙動変化の定性的な差異」を作り出すことができなかつたためであり、このような場合には、誤りの可視化のためにEBSを用いるべきではないと判断されなければならない。

以上の議論より、現在のところ筆者は、EBSによる誤りの可視化が効果的であるための条件(誤り可視化条件)を次のようにまとめている。

[可視化条件1] EBSとNSにおいて対応する対象オブジェクトの速度が定性的な差異を示すこと、すなわちオブジェクトの速度の定性値（すなわち {正, 0, 負}.）が異なる値を持つこと。例えば図3. 2において、式 (B) から計算される上昇するブロックの速度の定性値は"負", 式 (A) から計算される下降するブロックの速度の定性値は"正"であるから、式 (B) に基づくEBSと式 (A) に基づくNSとは、ブロックの速度において定性的な差異を示す。

[可視化条件2] 対象オブジェクトの速度が定性的な差異を示さない場合には、何らかのパラメータ摂動に対するそのオブジェクトの速度の変化率がEBSとNSにおいて定性的な差異を示すこと、すなわちオブジェクトの速度の変化率の定性値（すなわち {正, 0, 負}.）が異なる値を持つこと。例えば、EBSとNSにおいて斜面上のブロックが同じ方向に運動している場合でも、EBSではその速度が徐々に遅くなりNSでは徐々に速くなっているような場合、速度の時間に対する変化率すなわち加速度の定性値が前者では"負", 後者では"正"となることから、両者は速度の変化率において定性的な差異を示すといえることができる。また図3. 2において、式 (C) に基づく振舞いでは斜面の傾斜角 θ の増加に伴いブロックの速度は減少し、 θ の減少に伴いブロックの速度は増加するため、 θ の摂動に対する速度の変化率は"負"である。一方、式 (A) に基づく振舞いでは θ の増加に伴いブロックの速度は増加し、 θ の減少に伴いブロックの速度は減少するため、 θ の摂動に対する速度の変化率は"正"である。よって式 (C) に基づくEBSと式 (A) に基づくNSとは、 θ の摂動に対するブロックの速度の変化率において定性的な差異を示す。

本章においては以下、定性的な差異とは上記の2つの可視化条件のいずれかを満たす差異を意味するものとする。ここでEBSとNSの間の認識可能な差異を表す基本的物理量として速度を選んでいるが、これは挙動シミュレーションにおいて人間が最も容易に認識することのできる物理量は、オブジェクトの速度であるとの仮定に基づく。また速度と速度の変化率とでは、人間は前者の方をより容易に認識することができるとの仮定に基づき、上記の条件1を条件2に優先させることとする。

本研究では、EBSが上記の2つの誤り可視化条件のいずれかを満たす場合にのみ、それは誤り認識・修正支援にとって有効であるという立場をとる。そこでEBSを有効に運用する機構を計算機上を実現するためには、上記の誤り可視化条件に基づいてEBSの効果を診断し、それが効果的であるような形で学習者に提示するための制御を行うモジュールが必要となる。このモジュールをEBS-managerと呼ぶことにする。本研究では、問題および誤答例毎に個別に対応するのではなく、同一の手順でEBSの診断・制御を行えるメカニズムを持つ手法の提案を指向している。したがってEBS-managerが備えるべき要求仕様は、野田らによって提案されたEBS-generator [野田95] [Hirashima 95a] によって生成されるべきEBSが上記の誤り可視化条件を満たすかどうかを判

断し、それが効果的であると判断されるときにのみ、EBSを生成・提示できることであるとしている。誤り可視化条件を満たすかどうかを判断できることは、具体的には、EBSとNSにおいて対応する対象オブジェクトの速度が異なる定性値を持つかどうかを判断できること、また速度が異なる定性値を持たない場合には、何らかのパラメータ摂動に対するそのオブジェクトの速度の変化率がEBSとNSにおいて異なる定性値を持つかどうかを判断できること、かつそのようなパラメータがある場合にはそれを発見できることであるとする。

このようなEBS-managerの機能を実現するためには、運動方程式によって定量的に定式化された力学系の振舞いを定性的に解釈することが必要である。しかし例えばある運動方程式によって定量的に記述されるオブジェクトの定性的な振舞いを数値的な計算のみによって求めようとするならば、定性的性質の相違（状態変数の正負、増減など）を示す区間の設定、状態変数がどの区間に属するかを逐次的な計算など大きな計算量を必要とする上に、初期値によって異なる定性的振舞いを示す場合などの挙動予測を効率的に行うことが難しく、その都度計算を繰り返すといった手順を踏まなければならない。このため従来より定性推論研究において、定性的諸概念の定式化およびそれを比較的少ない計算負荷で処理する各種の推論技法が提案されている [西田 89] [西田 93] [淵 89]。前述の2つの可視化条件は、このような定性推論における定性的概念の定式化に一致するものであり、したがって定性推論の技法を用いることによって効率的に要求仕様を実現することができると考えられる。例えば後述（3. 2. 2. 1節）のような、力学系が初期値によって異なる定性的振舞いを示す場合の統一的な取り扱い、このような定性推論技法を用いて初めて実現できるものである。そこで本稿では、このようなEBS-managerの機能を実現するために、定性推論の技法を用いた手法を提案する[*3]。その具体的な実現方法を次節に示す。

3. 2. 2 EBS-managerの実現手法

前節で述べた要求仕様を満たすEBS-managerを実現するためには、力学系を構成するオブジェクトの速度の定性値、あるいは何らかのパラメータ摂動に対する速度の変化率の定性値を導出するための技法が必要となる。このうち速度および速度の時間に対する変化率（以下、本章では単に加速度と呼ぶ）に関しては、定性シミュレーションによって求めることが可能である。ここで定性シミュレーションとは、定性値へと離散化された物理系の振舞いを定性的に予測する技法である。また時間以外のパラメータ摂動に対する速度の変化率は、比較解析によって求めることが可能である。ここで比較解析とは、物理系の振舞いがあるパラメータの値を変化させたときどのように変化するかを推論する技法である。そこで本稿ではEBS-managerがEBSを診断・制御する

[*3] ただし本手法は、上記の2つの可視化条件にしたがってトップダウン的に提案されるものである。実際に物理の初学者に問題を与えた時の解答のプロトコル分析などによる知見を利用する、ボトムアップ的な見地からの本手法の検証は、今後の課題である。

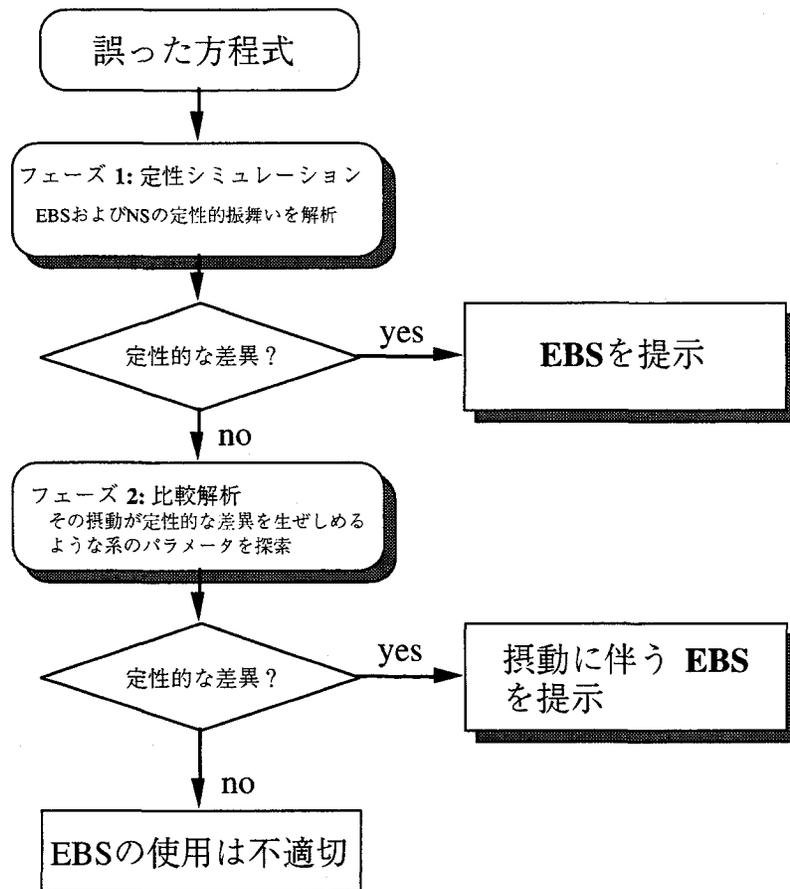


図 3. 3 EBS-managerのEBS制御の手続き

際の手続きを2つのフェーズに分け、第1のフェーズでは定性シミュレーションによって速度および加速度の定性値を、第2のフェーズでは比較解析によって系の時間以外のパラメータ(以下、これを単に系のパラメータと呼ぶ)摂動に対する速度の変化率の定性値を求め、そのEBSとNSにおける定性的な振舞いを比較するという手法を提案する。その手続きを図3.3に示す。すなわち第1のフェーズでは、EBS-managerはEBSおよびNSの定性的振舞いを比較し、両者の間に速度あるいは加速度において定性的な差異を発見すれば、そのEBSは誤りの可視化に効果的であると判断して学習者に提示する。両者の間にそのような定性的な差異を発見できなければ第2のフェーズに移行し、EBS-managerはその摂動がEBSおよびNSの間に速度の変化率において定性的な差異を生ぜしめるような系のパラメータがあるかどうかを調べる。そのようなパラメータを発見すれば、EBS-managerはその摂動に伴う速度の変化率が誤りの可視化に効果的であると判断する。そのようなパラメータが発見されない場合には、EBS-managerはEBSは誤りの可視化に効果的ではないと判断する。

3. 2. 2. 1 第1フェーズ：定性シミュレーション

まず初めに、EBS-managerは定性シミュレーションの技法を用いて、EBSおよびNSの定性的振

舞いを導出し両者を比較する。両者の間に速度あるいは加速度において定性的な差異が発見されるならば、EBS-managerはそのEBSは誤りの可視化に効果的であると判断し、学習者に提示する。

EBS-managerはQSIM (Qualitative Simulator) [Kuipers 86] [Kuipers 94]による定性シミュレーションを行って、誤った運動方程式に基づく振舞いの定性的状態の系列および正しい運動方程式に基づく振舞いの定性的状態の系列を導出する。ここで定性的状態（これをQSと呼ぶ）とは速度の定性値と加速度の定性値の組で表されるものとし、定性的状態QSの系列を $\{QS_1, \dots, QS_n\}$ と表記する。いま誤った運動方程式に基づく振舞いの定性的状態の系列を $\{QS_1, \dots, QS_n\}$ 、正しい運動方程式に基づく振舞いの定性的状態の系列を $\{QS'_1, \dots, QS'_n\}$ とすれば、EBS-managerは両者を比較して QS_i が QS'_i とが定性的な差異を示す区間を探索する。そのような区間、すなわち両者において速度の定性値または加速度の定性値が差異を示す区間を発見すれば、EBS-managerはその区間におけるEBSが誤りの可視化に対して効果的であると判断する。

例えば図3. 2において式(B)が立式された場合には、EBS-managerは定性シミュレーションによって、式(B)に基づくEBSでは速度および加速度の定性値が"負"であるのに対し、式(A)に基づくNSでは速度および加速度の定性値が"正"であることを発見する。したがってこの場合のEBSは誤りの可視化に効果的であると判断する。しかし式(C)あるいは式(D)が立式された場合には、それらに基づくEBSでは速度および加速度の定性値が"正"であるため、式(A)に基づくNSと同じ値となり、両者の間に定性的な差異が現れない。したがってこれらの場合のEBSは、そのままでは誤りの可視化に効果的ではないと判断する。

QS_i が QS'_i と定性的な差異を示す区間が複数個発見される場合には、EBS-managerはどの区間が誤りの可視化に最も効果的であるかを判断しなければならない。ここで最も効果的な区間とは、 QS_i と QS'_i とが最も効果的な定性的な差異を示す区間のことをいう。現在のところ筆者らは、速度における定性的な差異が加速度における定性的な差異よりも効果的であるというヒューリスティックスを用いている。これは速度と速度の変化率とでは、人間は前者の方をより容易に認識することができるという、3. 2. 1節の仮定に基づくものである[*4]。

例えば図3. 2の問題に初速度を付加した図3. 4において式(B)が立式された場合には、式(B)に基づくEBSが式(A)に基づくNSと定性的な差異を示す区間が2つ発見される。区間I1ではEBSは加速度の定性値においてのみNSと定性的な差異を示すが、区間I2ではEBSは速度および加速度の定性値においてNSと定性的な差異を示す。よってEBS-managerは、区間I2は区間I1よりも誤りの可視化に効果的であると判断する。またこのような場合、EBS-managerは所望の区間におけるEBSを提示するために、系のパラメータを調整する必要がある場合がある。すなわち図3. 4において式(B)が立式された場合には、QSIMは式(B)に基づく定性的状態の系列と

[*4] 一般には、どのような定性的な差異が学習者の誤り認識にとって最も効果的であるかを決定するためには、定性的な差異とその効果についての詳細な認知的分析が必要である。

式(A): $ma = mg \sin \theta$
(初速度 $v_0 > 0$)

式(B): $ma = -mg \sin \theta$
(初速度 $v_0 > 0$)

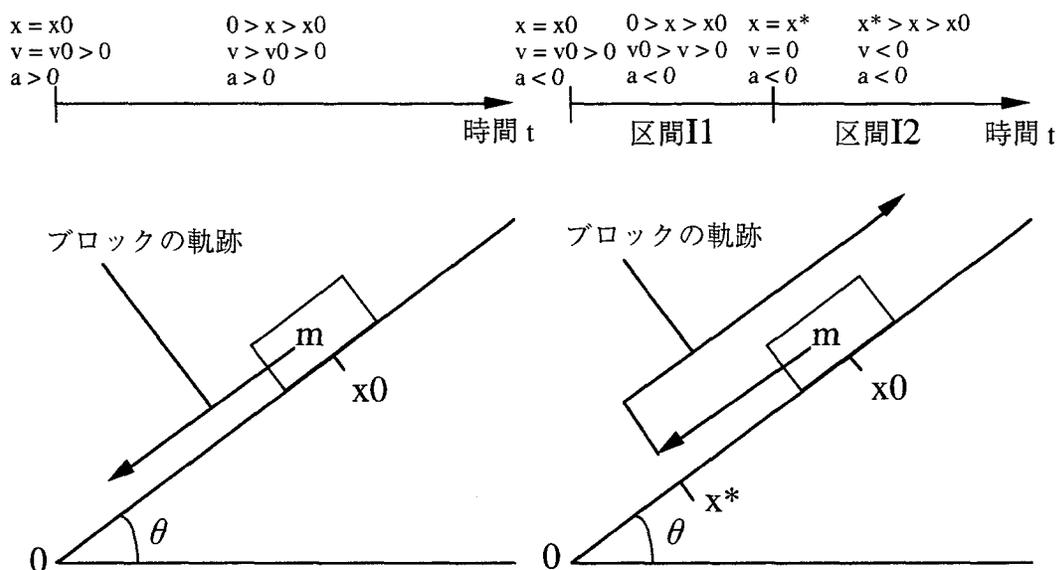
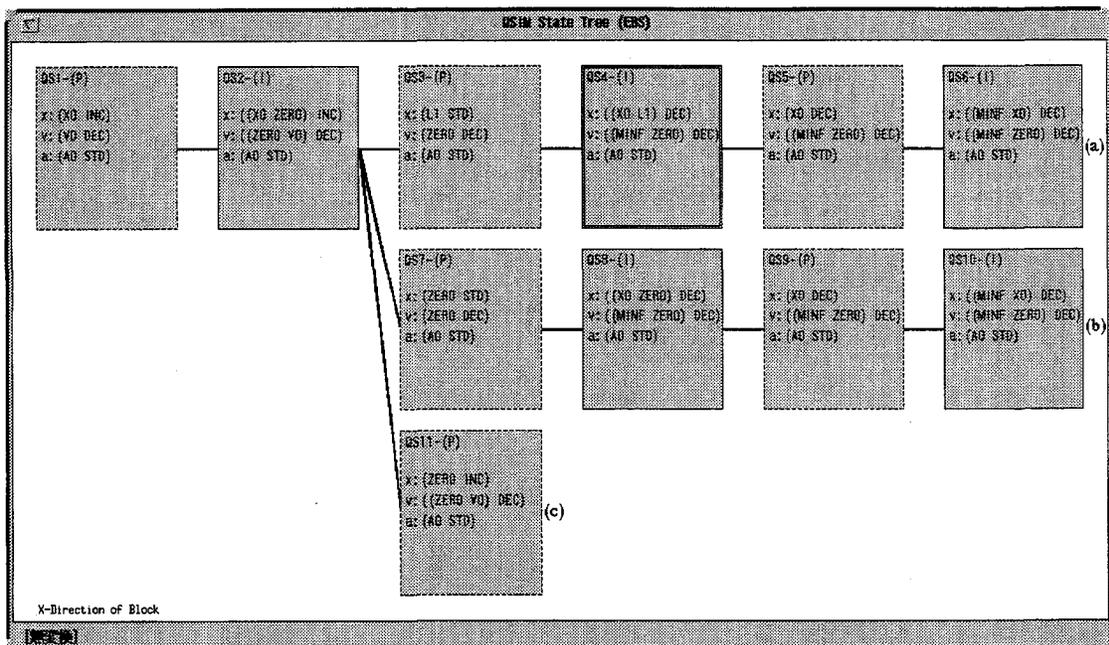


図 3. 4 EBSとNSの間に定性的な差異が生じる区間

して図 3. 5 のような 3 つに分岐した状態遷移木を生成する. このうち図 3. 4 の区間 I2 を含む定性的状態の系列は (a) あるいは (b) であるが, もし斜面の長さ (x_0) が短すぎるかあるいはブロックの初速度 (v_0) が大きすぎるならば, ブロックの速度が 0 に達する前に変位が 0 に達してしまう (すなわち反転・上昇せずに下向き の速度を持ったまま斜面下端に到達してしまう) 定性的状態の系列 (c) に従う振舞いが現れ, 所望の区間 I2 を含む定性的状態の系列に従う振舞いをしないという事態が生じる. したがって EBS-manager は, EBS においてブロックが所望の区間 I2 を含む定性的状態の系列に従う振舞いをするように, パラメータ x_0 あるいは v_0 を調整する必要がある. これは定性的情報のみを扱う QSIM の範囲を超えた問題であり, 現在の枠組みでは, 予め用意された初期値セットの中から適切なセットを選択するという方法をとっている. このような効果的な EBS を提示するためのパラメータ調整の方法を定式化することは, 今後の重要な課題の 1 つである.

3. 2. 2. 2 第 2 フェーズ: 比較解析

第 1 フェーズにおいて EBS および NS の定性的振舞いの間に速度あるいは加速度において定性的な差異が発見されなければ, 次に EBS-manager は比較解析の技法を用いて, その摂動が EBS および NS の間に速度の変化率において定性的な差異を生ぜしめるような系のパラメータがあるかどうかを調べる. 具体的には, その摂動が速度の変化率を生ぜしめるかどうかを調べるというプロセスを, 系のすべて可変パラメータに対して逐次的に行う. そのようなパラメータが発見されるならば, EBS-manager はその摂動に伴う速度の変化率が誤りの可視化に効果的であると判断し,



(図3. 4の式(B)に対する定性シミュレーション結果のシステム画面)

振舞い系列(a): ブロックが斜面下端に達する前に反転・上昇

振舞い系列(b): ブロックが斜面下端において反転・上昇

振舞い系列(c): ブロックが下向きの速度を持ったまま斜面下端に到達

図3. 5 状態遷移木の分岐

それを学習者に提示する。そのようなパラメータが発見されない場合には、EBS-managerはEBSは誤りの可視化に効果的ではないと判断する。

QSIMによって誤った運動方程式に基づく速度の定性値の系列および正しい運動方程式に基づく速度の定性値の系列を導出した後、EBS-managerはDQ解析(Differential Qualitative Analysis) [Weld 88] [Weld 90b]による比較解析を行って、系のパラメータの摂動に対する速度の変化率の定性値(これをQDと呼ぶ)の系列を導出する。このときの速度の変化率の定性値QDの系列を{QD1, ..., QDn}と表記する。いま誤った運動方程式に基づく速度の変化率の定性値の系列を{QD1, ..., QDn}、正しい運動方程式に基づく速度の変化率の定性値の系列を{QD1', ..., QDn'}とすれば、EBS-managerは両者を比較してQDiがQDi'と定性的な差異を示す区間を探索する。そのような区間を発見できなければ、EBS-managerは系の別のパラメータの摂動に対して同じプロセスを繰り返す。最終的にそのようなパラメータおよび区間を発見すれば、EBS-managerはそのパラメータおよび区間におけるEBSを学習者に提示する。

例えば図3. 6(問題は図3. 2と同一)において式(C)が立式された場合には、EBS-managerは定性シミュレーションによっては式(C)に基づくEBSと式(A)に基づくNSの間に定性的な差異を発見することができない。この場合EBS-managerは比較解析により、その摂動がEBSおよびNSの間に速度の変化率において定性的な差異を生ぜしめるような系のパラメータとして斜面の傾斜角 θ を発見する。すなわち θ の増加に伴いNSにおけるブロックの速度が増加するのに対

$$\text{式(A): } ma = mg \sin \theta$$

$$\text{式(C): } ma = mg \cos \theta$$

θ が増加するとき:

v: 増加

a: 増加

θ が増加するとき:

v: 減少

a: 減少

(矢印の長さは速度・加速度の大きさを表す)

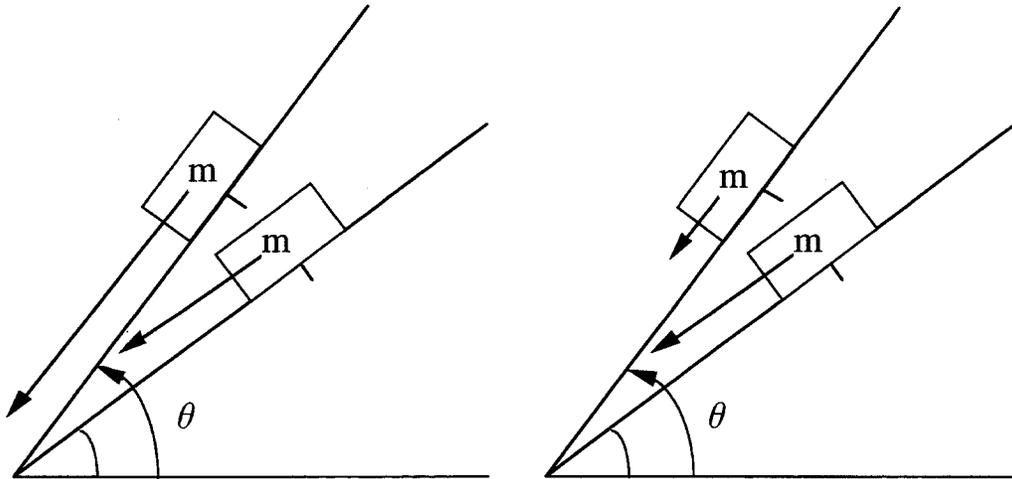
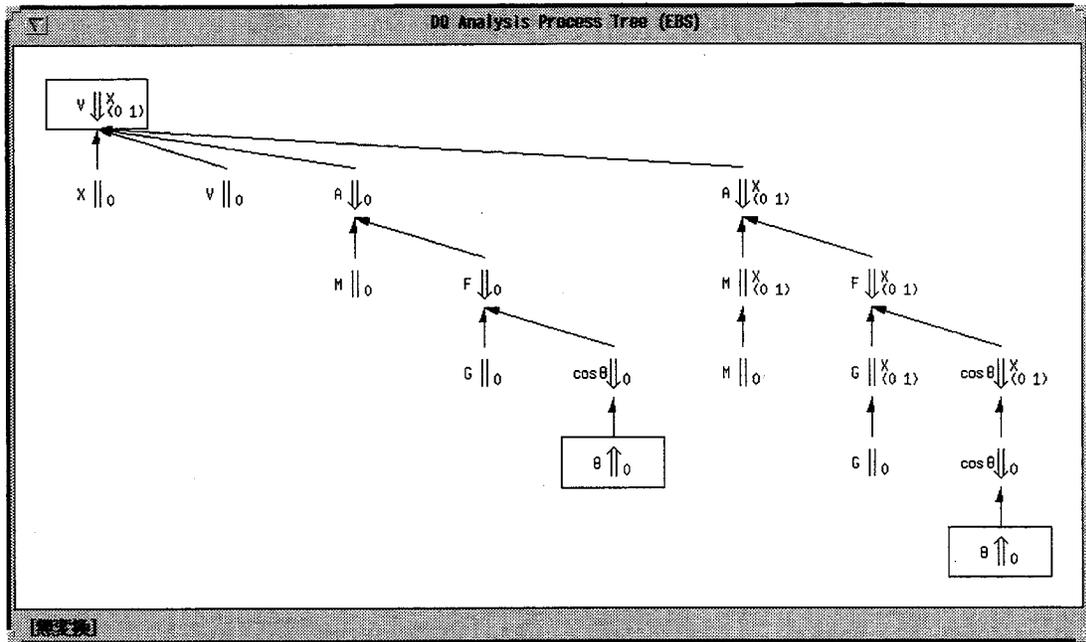


図 3. 6 パラメータの摂動によって生じる定性的な差異

して、EBSにおけるブロックの速度は減少するためである。式(C)に基づくEBSに対するDQ解析の推論過程を図3.7に示す。ここでは θ の増加に伴いブロックの速度が減少することが推論されている。

QDiがQDi'と定性的な差異を示す区間が複数個発見される場合、あるいはその摂動がEBSおよびNSの間に速度の変化率において定性的な差異を生ぜしめるようなパラメータが複数個発見される場合には、EBS-managerはどの区間あるいはパラメータが誤りの可視化に最も効果的であるかを判断しなければならない。ここで最も効果的な区間とは、QDiとQDi'とが最も効果的な差異を示す区間のことをいい、最も効果的なパラメータとは、その摂動がQDiとQDi'との間に最も効果的な差異を生ぜしめるパラメータのことをいう。現在のところ筆者らは、QDiとQDi'の値が"正"と"負"である場合を両者の値が"正"と"0"あるいは"負"と"0"の場合よりも効果的であるというヒューリスティクスを用いている。これは前者の方が後者より定性的な差異として認識し易いと考えられるためであるが、厳密には詳細な認知的分析によってその妥当性を確認する必要がある。

図3.2において式(D)が立式された場合には、EBS-managerは定性シミュレーションによって式(D)に基づくEBSと式(A)に基づくNSの間に速度あるいは時間に対する速度の変化率においていかなる定性的な差異も発見することができず、さらに比較解析によってもその摂動が両者の間に速度の変化率において定性的な差異を生ぜしめるようないかなるパラメータも発見する



(図3. 6の式(C)に対するDQ解析の推論結果のシステム画面)

図3. 7 DQ解析の推論過程

ことができない。したがってEBS-managerは、この場合EBSは誤りの可視化に効果的ではないと判断する。このような場合の取り扱いについては3. 3節および第4章で議論する。

3. 3 評価実験

前節で述べた手法によってEBSの効果の診断および提示の制御を行うEBS-managerを含むEBS生成・制御システムを、Sun SPARCstation10上に実装した。本章で提案した誤り可視化条件およびEBSの診断・制御手法の効果を評価するため、本システムを用いて工学部の大学院生で家庭教師経験のある被験者10名を対象に評価実験を行った。具体的には図3. 2の問題を例題として、式(B)、式(C)、式(D)の誤答に対してEBS-generatorおよびEBS-managerによって生成・制御されたEBSをそれぞれ式(A)に基づくNSと同時に被験者に提示し、(1) どちらの振舞いが正しいかを判断することができるか、(2) 誤りの可視化に対してそのEBSが効果的であると思うかどうか、を質問した。図3. 8は実験に用いたシステムの画面例である。同図では、画面上方に式(B)に基づくEBSが、画面下方に式(A)に基づくNSが提示されている。

本手法は物理の初学者に対する教育場面を想定しているため、本来被験者としては、この問題を教育課程で学習する世代の学習者を用いることが望ましい。したがって本評価実験は、本手法の有効性を直接的に検証するものとはなっていない。しかしながら、本稿で提案した誤り可視化手法およびその実現手法の設計理念上の妥当性を検証することを目的として、各誤答例においてシステムの提示するEBSの有効性を、被験者に教師の立場から評価して貰うことは充分妥当であると考えられる。被験者として実際に例題を教育課程で学習中の被験者を用いた直接的な教育効

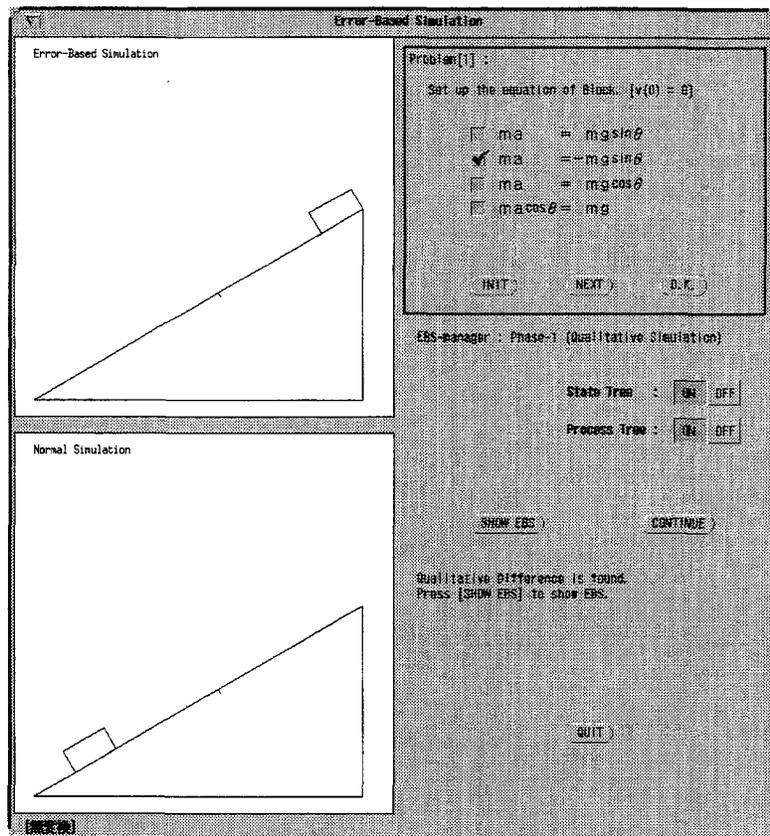


図 3. 8 システム画面

果の測定は、今後の課題である。

実験結果は次の通りである。式 (B) は、定性シミュレーションによって EBS が式 (A) に基づく NS と定性的な差を持つと判断されるため、EBS-manager がその EBS をそのまま提示する場合である。EBS においてブロックが斜面に沿って上昇する振舞いを観察した結果、被験者全員が EBS の不自然さを認識し、どちらの振舞いが正しいかを判断することができた。また被験者全員が、この場合 EBS は誤りの可視化に対して効果的であると回答した。よってこの場合には実験結果より、EBS は式 (B) の誤りを可視化するのに効果的であると結論することができる。

式 (C) は、定性シミュレーションによっては EBS と式 (A) に基づく NS の間に定性的な差が発見されないため、EBS-manager がその EBS はそのままでは効果がないと判断する場合である。このとき EBS-manager は比較解析により、斜面の傾斜角 θ をその摂動が EBS および NS の速度の変化率の間に定性的な差を生ぜしめるパラメータとして発見する。よって EBS-manager は EBS および NS において斜面の傾斜角 θ を摂動させ、 θ の摂動前および摂動後における挙動シミュレーションを提示する。このとき被験者は、EBS および NS において θ の摂動に対する速度の変化率を観察することになる。EBS において θ の増加に伴いブロックの速度が減少する振舞いを提示した結果、8 名の被験者が EBS の不自然さを認識し、どちらの速度の変化率が正しいかを判断することができた。また彼らは、この場合の EBS は誤りの可視化に対して効果的であると回答した。

回答を保留した残りの2名の被験者は、システムのインターフェース上の改善すべき点を指摘した。これは実験ではパラメータ摂動に対する速度の変化率を、パラメータ摂動前と摂動後の2つの挙動シミュレーションとして同時に提示することによって表現し、これをEBSの場合とNSの場合とで別々に2回に分けて画面上に表示したため、EBSとNSとを比較しにくかったというものである。しかし基本的には彼らもこの場合のEBSは誤りの可視化に対して有望であるということに同意しており、インターフェースの改善によって効果的になり得るという見解を表明している。よってこの場合にも、パラメータの摂動に伴う速度の変化率を示すように修正を施されたEBSは式(C)の誤りを可視化するのに効果的であると結論することができる。またこのとき、比較のため θ を摂動させずにそのままのEBSとNSとを提示したところ、被験者全員がどちらの振舞いが正しいかを判断することができなかった。また被験者全員が、この場合のEBSは誤りの可視化に対して効果的ではないと回答した。この事実はEBS-managerの必要性を示唆するものである。

式(D)は、定性シミュレーションによっても、また比較解析によってもEBSと式(A)に基づくNSの間に定性的な差が発見されない場合である。このような場合には、現在のところEBS-managerは、EBSは式(D)の誤りの可視化に対して効果的ではないと判断する。このような場合にEBSが効果的になるような方法があるかどうかを被験者に質問したところ、3名の被験者から、斜面の傾斜角 θ を0にまで変化させるか(このとき平面となる)あるいは90度にまで変化させれば(このとき直立した壁となる)EBSおよびNSの速度の間に定性的な差が生じるとの指摘がなされた。 θ を0にまで変化させたとき、NSではブロックは静止するのに対し式(D)に基づくEBSではブロックは重力加速度をもって移動する。また θ を90度にまで変化させたとき、NSではブロックは重力加速度をもって落下するのに対し式(D)に基づくEBSではブロックは無限大の加速度をもって落下する。よって確かにこれらの場合、EBSとNSの間に速度および加速度の定性値において差異が生じることになる。しかしながら、このようにあるパラメータをその上限・下限にまで変化させた場合の系の挙動変化を予測することは、パラメータの微小変化すなわち摂動に対する系の挙動変化のみを取り扱うDQ解析の範囲外であるため、本章の手法では取り扱うことができない。このような場合を取り扱うことができるようにEBS-managerのとり得るEBS修正戦略を拡張・整理することは、今後の課題であり、これについては第4章において論じる。

3. 4 関連研究

本節では、EBSによる誤りの可視化手法を関連研究と比較することによって位置づけ、またその誤答の修正方法との関連について述べる。

一般に、問題解決に先立って正しい物理概念を教授されているにもかかわらず誤答を生成する学習者は、改めて正しい物理概念だけを教授されても、以前の誤答を再発する可能性が大きいと

言われている [VanLehn 88]. これは、正しい物理概念だけを教授する方法では以前の誤答を引き起こした原因が除去されない、すなわちなぜ自己の解答が誤りであったのかを学習者が充分理解できないためであると考えられる。したがって誤答を生成する学習者を正しい理解へと導くためには、その誤答が確かに誤りであることを十分に認識させることがまず重要であり、その上で正答を生成するための正しい物理概念を教授することが望ましい。このような学習者の誤り認識・修正を支援するため、従来より、正しい物理概念を反映した正しい挙動シミュレーションやその定性的説明の生成・提示に関する研究が盛んに行われている [植野 93] [渡辺 95] [Asami 96] [White 93]. これらは学習者に対して正しい物理概念に基づく正しい挙動シミュレーションを提示することにより、学習者に自己の物理概念における仮説を検証させ、それが誤っていれば学習者に内省を促し、修正へと導く手法である [Collins 88] [Gagne 85] [Glynn 91] [Osborne 85]. 一方、本研究における EBS による誤りの可視化手法は、学習者の物理概念における仮説を、それが誤りであったとしてもそのまま反映した挙動シミュレーションを提示することにより、学習者により明示的に誤りを認識させることを指向したものである。自己の誤りが正しい物理概念と矛盾する様子を可視化世界において観察することにより、学習者はそれを修正するための内省をより強く動機づけられることが期待される。誤りの認識からその修正への過程を具体的に支援することは、誤り発生の原因をも考慮しなければならない難しい課題であるため、その過程を専ら学習者の内省に任せるという上記の 2 つの方法は、現時点では充分妥当なものであると筆者は考えている。したがって当面の課題としては、いかにしてより良い条件の下で学習者に内省を促すかに重点を置いた支援方法を検討することが重要であると考えられる。そのような支援を EBS による誤りの可視化手法を用いて実現するための方法としては、例えば学習者に運動方程式上あるいは挙動シミュレーション環境上での直接的な操作を許し、その影響を直ちにそれぞれ挙動シミュレーション環境上あるいは運動方程式上へ反映させて提示する環境を提供して、学習者の内省を積極的に促進するというものが考えられる。さらには関連する物理量のグラフ表示などを援用することも検討中である。このとき、どのような操作やどのような情報提示が誤り修正に効果的であるかを分析することが課題となるが、このように様々なファクターを整理していくことにより、EBS による誤りの可視化を用いた誤り認識・修正支援のための統合的な環境を実現することが可能であると考えられる。

3. 5 結言

本章では、マルチメディアが人間に与える影響を見積もった上での運用が可能であることを示すため、力学における挙動シミュレーションの分野を取り上げ、それが学習者に与える効果を適切に定式化することによってそのような運用が可能になることを示した。すなわち EBS を誤り認識・修正支援に効果的に運用するため、EBS が誤りの可視化に対して効果的であるための可視化

条件を整理し、またそれに基づいてEBSの診断および提示を制御するEBS-managerの枠組みおよびそれを定性推論の技法を用いて実現する手法を提案した。またその手法によって実装されたEBS-managerを用いて評価実験を行い、適切に運用されたEBSが誤りの可視化に対して効果的であることを確認した。さらにその際、問題および誤り例によっては、本手法では取り扱うことができない場合が存在することを指摘した。

第4章においては、本手法をより一般的な問題に拡張すべく、本章で指摘された課題を詳細に分析し、EBSによる統合的な誤り可視化環境の構築、ひいては一般のマルチメディアが人間に与える影響を見積もった上での運用方法に関する指針として整理する。

第4章

EBSの誤り可視化効果に関する諸要因とその構造

4.1 緒言

本章では、第3章において提案したEBSによる誤りの可視化、およびその効果の診断・制御手法をより一般的な問題および誤答例に拡張すべく、EBSの誤り可視化効果を決定する諸要因を抽出・分析し、EBSの構造を明らかにすることを目的とする。本研究は、単にEBSの適用範囲の拡大のみならず、EBSによる統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現、ひいてはEBSという特殊な視覚メディアに限られない一般のマルチメディアが人間に与える影響を適切に見積もった運用を実現するための、有益な知見を与えるものと期待される。

第3章において提案したEBSの診断・制御手法は、評価実験を通して幾つかの例題に関してはその有効性が確認されたが、実験結果から次のような問題点も指摘された。すなわち、従来のEBSの生成および診断・制御手法では、(1)可視化される対象となる物理属性が速度に限られていたため、それ以外の物理属性に誤りが現れるような場合にそれを効果的に可視化できない、(2)定性差を生ぜしめる手法としてパラメータ摂動のみを扱っていたため、可視化できる誤り例が限られていたなど、適用できる問題の範囲が必ずしも広くないというものである。そこで筆者は、速度以外の可視化対象属性の導入、それに伴う誤り可視化条件の見直し、および定性的差異を生ぜしめる手法の充実という、3つの軸においてEBSの適用範囲の拡張を検討した結果、そこから拡張されたEBSの誤り可視化効果を決定する3つの要因を抽出した。それらをそれぞれ「誤り可視化属性」、「誤り可視化条件」、「誤り可視化状況」と呼ぶ。また、それぞれの要因は、その選択肢中から最も効果が高いと見積もられた候補を独立に選び出して単に組み合わせれば良いというものではなく、互いに関係し合っているため場合によっては競合を起し、期待される誤り可視化効果を持つEBSが得られないことがある。そのため、このように拡張されたEBSの効果を適切に見積もるためには、各々の要因内での候補同士の優先順位を明確にすると共に、要因同士の関係をも明確にする必要がある。このため、筆者はEBSを構成する要因およびそれらの競合関係を目的別に考察し、「EBSの見え方」、「EBSの見せ方」という2つの視点から整理して、EBSの効果を決定する諸要因の構造を明らかにした。これによって拡張されたEBSを、その誤り可視化効

果を適切に見積もった上で運用することが可能となる。

以下本章では、4.2節において、従来のEBSの適用範囲を拡張するための方法として、「誤り可視化属性」、「誤り可視化条件」、「誤り可視化状況」という3つの要因について述べ、さらにそれぞれの要因内での候補同士の優先順位について考察する。さらに4.3節においては、要因同士が関係し合っているため競合を起こす具体的な例を挙げ、その問題を解決するために「EBSの見え方」、「EBSの見せ方」という2つの視点を導入する。それに基づいて、4.4節では拡張されたEBS構造を明らかにし、それぞれの視点からのEBSの設計アルゴリズムを提案する。最後に4.5節において、本章の総括を行い、今後の課題について述べる。

4.2 EBSの誤り可視化効果を決定する諸要因

4.2.1 誤り可視化属性

誤り可視化属性とは、学習者の生成した運動方程式中の誤りを反映するために選択される物理量のことをいう。3.2節の可視化条件では、EBSとNSの間の認識可能な差異を表す基本的物理量として速度が選択され、その定性値あるいは変化率の定性値の違いが人間に両者の差異の認識を促すものとして仮定されている。これはEBSおよびNSが計算機上の挙動シミュレーションであるという性質上、速度が最も直観的に人間の認知に訴える物理量であるとの根拠に基づいている。しかし一般には、ある種のメタファを用いれば速度以外の物理量を可視化対象属性として利用することも可能であり、例えば図4.1(a)のように、滑車にかかる力を矢印で表現すれば、力の定性値は矢印の方向で、力の変化率の定性値は矢印の長さの増減で表現することができる。このようなメタファを導入することにより、速度以外の物理量を用いた誤りの可視化も、速度の場合と同様に本枠組みにおいて取り扱うことができる。

ただし、可視化属性を選択する際には、メタファを用いなくても可視化できる速度などの物理量を、メタファを用いなければ可視化できない力などの物理量に優先するというヒューリスティックスを設定する。これは、人間がメタファを解釈して認知するためには、そうでない場合に比べてある程度の負荷を伴うことから [瀬戸 95]、妥当なものであると考えられる。

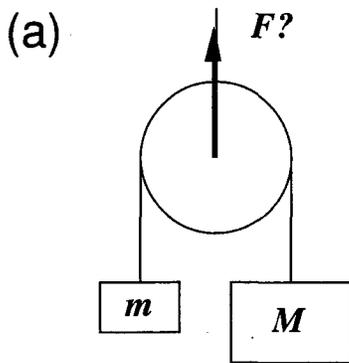
4.2.2 誤り可視化条件

誤り可視化条件とは、選択された誤り可視化属性が人間にとって「不自然である」と認識されるための定式化された判断基準のことをいう。ここでは、3.2節で述べた速度に対する可視化条件を踏まえ、一般の誤り可視化属性に対しても、次のような誤り可視化条件を設定する。

[可視化条件1] EBSとNSの可視化属性の定性値の間に、差異があること。

[可視化条件2] EBSとNSの可視化属性の1階微分量の定性値の間に、差異があること。

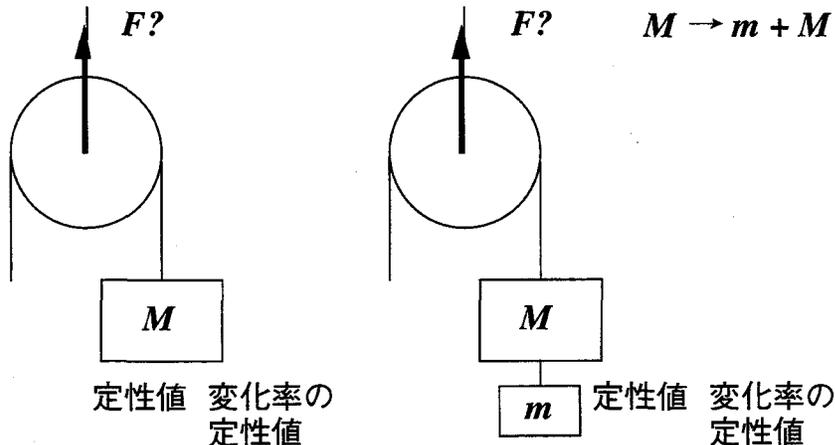
[問] 滑車にかかる力を求めよ。



(正答) $F = 4mMg / (m + M)$

(誤答) $F = (m + M)g$

(b)可視化状況(1): $m \rightarrow 0$ (c)可視化状況(2): $m \rightarrow 0,$



(正答) $F = 0$ [0] [-]

定性値 変化率の
定性値

(正答) $F = 0$ [0] [-]

定性値 変化率の
定性値

(誤答) $F = Mg$ [+]

[-]

(誤答) $F = (m + M)g$ [+]

[0]

[可視化条件 1] ○

[可視化条件 1] ○

[可視化条件 2] ×

[可視化条件 2] ○

図 4. 1 滑車にかかる力の問題

この仮定は、速度が誤り可視化属性である場合の実験結果（第 3 章）から、十分な妥当性を持つものであると考えられる。

また、速度の場合の実験結果から、次のようなヒューリスティックスを設定することは妥当であると考えられる。すなわち、生成された EBS が可視化条件 [1] および [2] を同時に満たす場合を最もよく誤りが反映されている場合として最優先し、次いで可視化条件 [1] のみを満たす場合、最後に可視化条件 [2] のみを満たす場合の順に優先する。

4. 2. 3 誤り可視化状況

誤り可視化状況とは、選択された誤り可視化属性が、設定された誤り可視化条件を満たすように力学系に対して設定する状況のことをいう。これは変化させるべきパラメータの選択およびそれをどのように変化させるかの選択から成っている。例えば、図 4. 2（図 3. 2 と同一の問題）

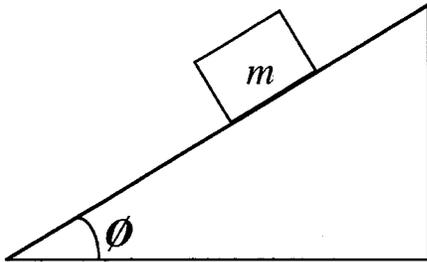
の誤答 (C) において、斜面の傾斜角の摂動に対するブロックの速度の変化率の定性差を可視化するために、斜面の傾斜角 θ を摂動させることなどがこれにあたる。また、同図の誤答 (B) においては、特にそのような操作を加えなくてもブロックの速度の定性差は可視化されるため、系のどのようなパラメータをも変化させないということ自体(すなわちそのままの挙動シミュレーション)が、可視化状況となっている。

第3章の枠組みでは、選択された可視化属性がそのままでは可視化条件 [1] を満たさない場合、可視化条件 [2] に注目し、系のパラメータ摂動に伴う定性的な挙動変化を求めるため、DQ解析の技法を用いて可視化属性の変化率の定性値を導出する手法を提案した。しかしながら3.2節および3.3節で指摘したように、DQ解析はパラメータの微小変化に対する系の挙動変化のみを取り扱う技法であるため、例えば図4.2で学習者が式 (D) を生成した場合のように、パラメータを上限・下限にまで変化させたときに初めて定性的な差異が現れるような場合(図4.2 (d)) を本手法では取り扱うことができない。しかしパラメータをその上限・下限にまで変化させたときの系の挙動変化を定性的に調べることは、パラメータ摂動に伴う系の挙動変化を定性的に調べることと同じく、EBSとNSの間の定性的な差異を作り出すための有益な手法であり、前者は後者が取り扱うことのできない範囲を補完している。

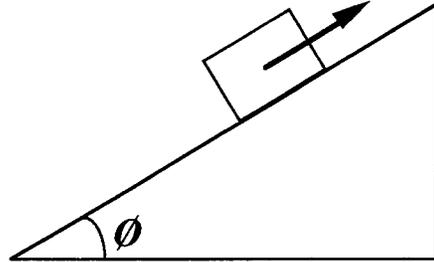
そこで筆者は、挙動変化における定性的差異を作り出すためには、系に広い意味での「変動」

[問] 斜面上のブロックの運動方程式を立てよ。

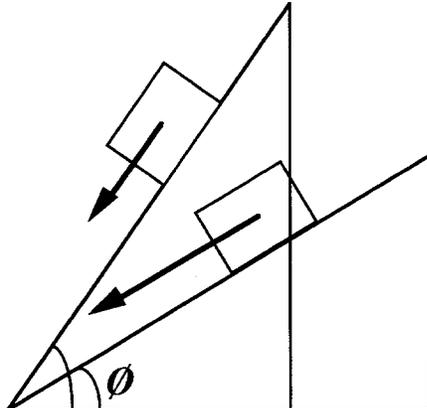
(a) 正答 (A): $ma = mg \sin\theta$



(b) 誤答 (B): $ma = -mg \sin\theta$



(c) 誤答 (C): $ma = mg \cos\theta$



(d) 誤答 (D): $ma \cos\theta = mg$

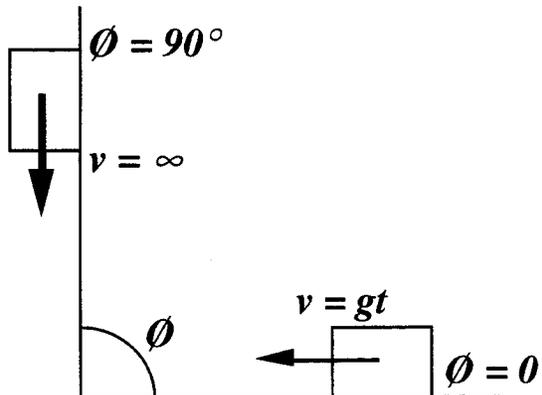


図4.2 斜面上のブロックの問題

を加えることが有効であると考えている。3. 2節において取り扱った、パラメータを微小変化すなわち摂動させるという手法は、このための1手法であると位置づけることができる。この他の手法としては、例えば上記のようにパラメータをその上限・下限などの境界値にまで変化させるという（微小変化ではない）手法が有力であると考えられる。このように、系のパラメータの変化を微小変化すなわち摂動に限らず比較的大きな変動をも考慮することで、系の変化率の定性的な差異を作り出す手法の充実が図られると考えられる。筆者はこれを「パラメータ変動手法」と呼んでおり、その際、変動させるべく選択されるパラメータ（物理量）を、特に「変動対象属性」と呼ぶ。その他のパラメータ変動手法としては、上記の各々のパラメータ変動手法の際に、総量を不変に保ったまま系の2つのパラメータを同時に変動させることなどが考えられる。ここでは系のパラメータに摂動を加える手法を「パラメータ摂動法」、系のパラメータをその上限・下限などの境界値にまで変化させる手法を「パラメータ境界値法」と呼び、それぞれについて同時に変動させる2つのパラメータの総量を保存する手法を「パラメータ摂動法 [保存]」、「パラメータ境界値法 [保存]」と呼ぶことにする。

これらのパラメータ変動手法は、それぞれ系に加える変動の大きさが異なっているが、学習者に作為的な印象を与えないようにするためには、なるべく系に加える変動が小さいことが望ましい。したがって、ここではパラメータ変動手法の優先順位として「そのままの系」を最優先し、次いで「パラメータ摂動法」、「パラメータ摂動法 [保存]」、「パラメータ境界値法」、「パラメータ境界値法 [保存]」の順に優先するというヒューリスティックスを設定する。これは系に加える変動が大きいほど、学習者が感じる作為的な印象が大きいことから、妥当であると考えられる。

また、3. 2節、3. 3節および上記の例題では、系の変動パラメータとして時間（加速度の場合）および斜面の傾斜角のみを挙げたが、その変動がEBSとNSとの間に定性的な差異を生ぜしめるパラメータとしては他にも、質量・摩擦係数などいくつか考えられる。パラメータの変動を伴うEBSを学習者に提示するためには、その変動を挙動シミュレーション上で可視化する必要があるが、変動させるパラメータによっては何らかのメタファを用いなければならない場合がある。例えば図4. 2において、斜面の傾斜角 θ の変動はメタファなしで（斜面を表す三角形の頂角の大きさで）表現できるが、ブロックの質量 m の変動はブロックを表す長方形の大きさというメタファを用いて表現しなければならない。このように系の各パラメータは、その変動を表現するための方法がそれぞれ異なるため、たとえ複数のパラメータがその変動によってEBSとNSとの間に同程度の定性的な差異を生ぜしめるとしても、それをEBSとして学習者に提示する際の効果には違いがあると考えられる。そこで変動対象属性に関しても、4. 2. 1節と同じく、メタファを用いなくても変動を表現できる角度などの物理量を、メタファを用いなければ変動を表現できない質量などの物理量に優先するというヒューリスティックスを設定することとする。

4. 3 要因同士の競合と EBS の視点

4. 3. 1 EBS の誤り可視化効果を決定する要因同士の競合

4. 2 節においては、EBS の誤り可視化効果を決定する要因である誤り可視化属性、誤り可視化条件および誤り可視化状況について説明し、また各々についてその要因内での候補同士の優先順位を妥当なヒューリスティックスとして設定した。したがって本来ならば、各々の要素内での最も優先順位の大きい候補を選択して組み合わせることにより、最も誤り可視化効果の大きい EBS を生成できると期待されるが、各要因は互いに関係し合っているため競合を起す場合がある。

例えば図 4. 1 の誤答例においては、滑車にかかる力 F を誤り可視化属性にとった場合、誤り可視化状況 (1) (パラメータ境界値法) を用いることにより、誤り可視化条件 [1] のみが満たされるのに対し (同図 (b))、誤り可視化状況 (2) (パラメータ境界値法 [保存]) を用いれば、誤り可視化条件 [1] および [2] を同時に満たすことができる。したがって、誤り可視化条件に関する見地から言えば、同図 (c) のような EBS を生成するべきであると結論されるべきである。しかしながら、誤り可視化状況に関する見地から言えば、可視化状況 (1) (パラメータ境界値法) が誤り可視化状況 (2) (パラメータ境界値法 [保存]) に優先されるべきである。ただしその場合、前者では誤り可視化条件 [1] しか満たされないのに対し、後者では誤り可視化条件 [1] および [2] が同時に満たされることになる。

これはすなわち、誤り可視化条件における優先順位と誤り可視化状況における優先順位とが競合を起し、生成される EBS の全体としての効果に影響を及ぼしている例となっている。実際、この例題を用いて予備的な実験を行ったところ、同図 (c) の EBS の方が誤りがより顕在化しているので効果的であるとする被験者と、同図 (c) では系に加える変動が大きくより作為的な印象を与えるため誤りの顕在化に関する優位性が打ち消され、かえって同図 (b) の EBS の方が効果的であるとする被験者とがほぼ同数存在した。

したがって一般に、これらの要因を踏まえて EBS を設計する際には、各要因内の候補同士の優先順位 (これを各要因内での局所的優先順位 (local preference) と呼ぶ) だけでなく、それらの互いの関係をも考慮しなければならない。しかしながら、上記の例題からもわかる通り、これらの要因はしばしばトレードオフの関係にあるため、どのような見地からも最適である EBS を設計することは一般に難しい。そこで次節では EBS の設計に 2 つの視点を導入して EBS の構造を明らかにし、それぞれの視点から見た場合の最適な EBS の設計法について議論する。

4. 3. 2 EBSの視点の導入

4. 3. 2. 1 「EBSの見え方」

誤り可視化条件とは、選択された誤り可視化属性がどの程度「不自然な」挙動を示すか、という基準である。すなわち、誤り可視化条件の局所的優先順位が高いほど、EBSはNSに対して大きな差異を示し、誤りがより増幅されて可視化されることになり、学習者に与えるインパクトは大きくなる。このように、学習者の立式上の誤りがより増幅されて可視化されることを「EBSの見え方」のインパクトが大きい、と呼ぶ。

この視点はまた、どのような物理属性を誤り可視化属性として選択するかにも依存している。すなわち、いくら誤り可視化条件の局所的優先順位が高いEBSを生成しても、見せるべき誤り可視化属性の局所的優先順位が低ければ(つまり非常に弱いメタファを用いてようやく可視化できるような物理属性であれば)、そのEBSが学習者に与えるインパクトは小さくなってしまう。この意味で、「EBSの見え方」の決定に際しては、誤り可視化属性の局所的優先順位と誤り可視化条件の局所的優先順位とは競合する可能性を持っていると言える。

なお、EBSの設計に際して「EBSの見え方」という視点を選択する場合には、いかにして学習者の立式上の誤りをより増幅して可視化するかのみを考慮の対象とするため、誤り可視化状況の局所的優先順位については考慮しないものとする。

4. 3. 2. 2 「EBSの見せ方」

誤り可視化状況とは、選択された誤り可視化属性に「不自然な」挙動を示させるためにどのような変動を系に加えるか、という提示の仕方である。すなわち、誤り可視化状況の局所的優先順位が高いほど、EBSは学習者の立式を自然な形で可視化し、学習者に与える説得力は大きくなる。このように、学習者の立式上の誤りがより自然な形で可視化されることを「EBSの見せ方」の説得力が大きい、と呼ぶ。

4. 3. 1節でも例示したように、誤り可視化条件の局所的優先順位を高くすることが誤り可視化状況の局所的優先順位を低くする結果となり、学習者に作為的な印象を与えてEBSの全体としての効果を小さくするという場合があるため、このような「EBSの見せ方」という視点は「EBSの見え方」と同様、重要であると考えられる。

この視点はまた、どのような物理属性を変動対象属性として選択するかにも依存している。すなわち、誤り可視化状況はパラメータ変動手法と変動対象属性とから成っているため、いくらパラメータ変動手法の局所的優先順位が高いEBSを生成しても、変動させるべき変動対象属性の局所的優先順位が低ければ(つまり非常に弱いメタファを用いてようやくその変動が表現できるような物理属性であれば)、そのEBSが学習者に与える説得力は小さくなってしまう。この意味で、「EBSの見せ方」の決定に際しては、変動対象属性の局所的優先順位とパラメータ変動手法の局

所的優先順位とは競合する可能性を持っていると言える。

なお、EBSの設計に際して「EBSの見せ方」という視点を選択する場合には、いかにして学習者の立式上の誤りをより自然な形で可視化するかのみを考慮の対象とするため、誤り可視化条件の局的優先順位については考慮せず、少なくとも最も低い局的優先順位の誤り可視化条件さえ満たしていればよいものとする。

4. 4 EBS の設計アルゴリズム

4. 2節および4. 3節での考察に基づいて、拡張されたEBSの誤り可視化効果に関する構成要因およびその構造を図示したものを図4. 3に示す。本節では同図に従い、EBS構成要因の構造に基づいたEBSの設計アルゴリズムを、「EBSの見え方」および「EBSの見せ方」の2つの視点について提案し、さらにそれらに基づいた統合的なEBSの設計アルゴリズムを提案する。

4. 4. 1 「EBSの見え方」優先のEBSの設計アルゴリズム

「EBSの見え方」優先の場合のEBSの設計アルゴリズムを図4. 4に示す。4. 3. 2. 1節でも述べたように、「EBSの見え方」の視点を選択した場合でも、誤り可視化属性の局的優先順位と誤り可視化条件の局的優先順位とが競合する可能性が残されている。この競合を解消するために、筆者は学習者に関する情報、および問題・誤り例とを索引とした事例ベースの併用を考えている。すなわち、学習者毎にどちらを優先する傾向があるかの情報を蓄積した学習者モデル、および過去に同じ問題・誤り例に対してどちらを優先するのが効果的であったかを蓄積した

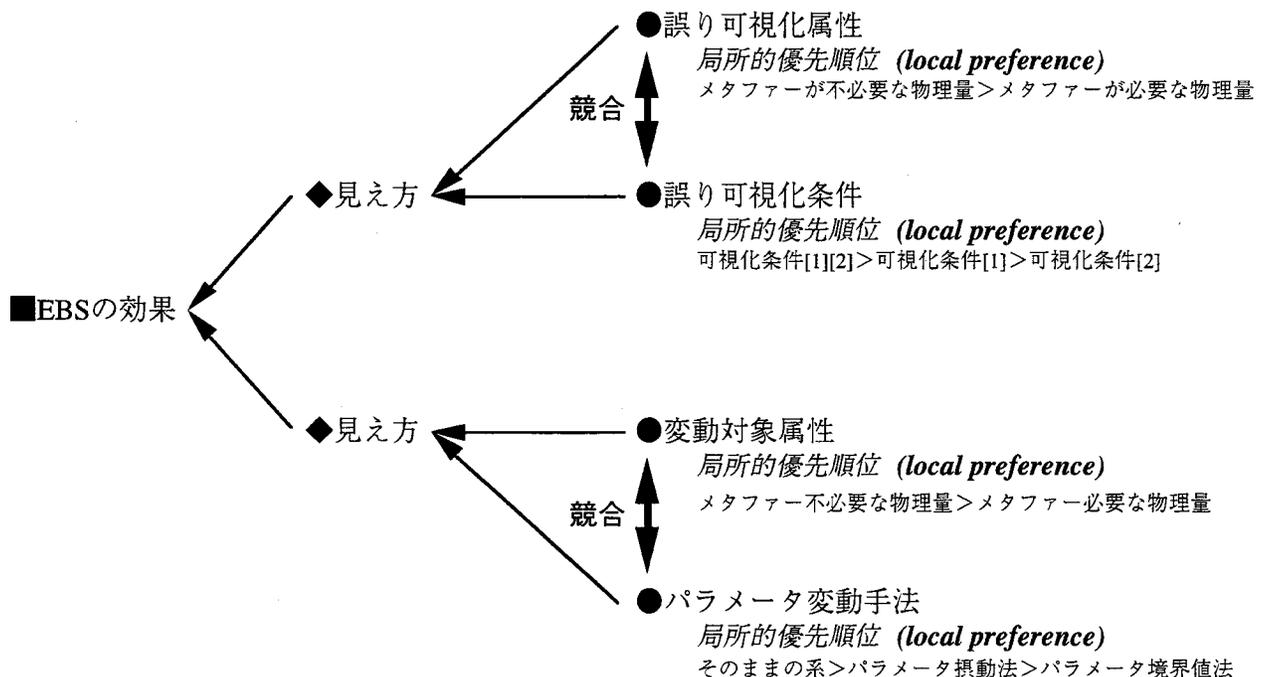


図4. 3 EBS 構成要因の構造

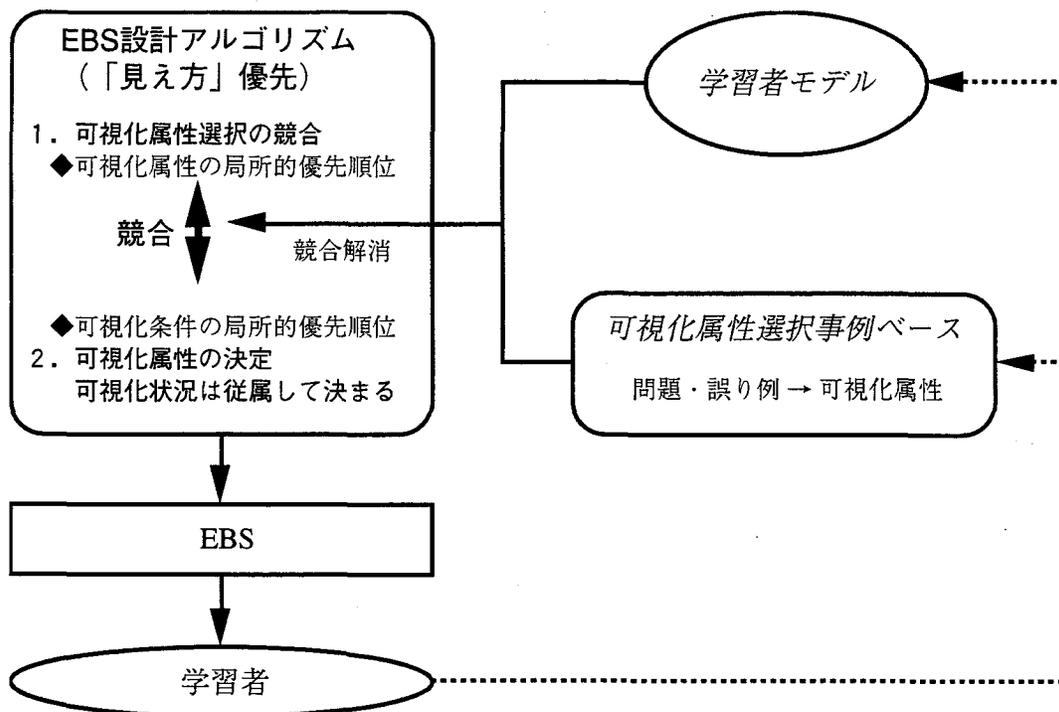


図 4. 4 「EBS の見え方」優先の EBS 設計アルゴリズム

事例ベースから、誤り可視化属性と誤り可視化条件のどちらを優先するかを決定するというものである。

そのような情報に基づく判断の結果、誤り可視化属性を優先する場合には、(少なくとも誤り可視化条件のどれかを満たす)その局所的優先順位の最も高いものを誤り可視化属性として選択する。また、誤り可視化条件を優先する場合には、その局所的優先順位の最も高いものを満たす物理属性を誤り可視化属性として選択する。

この場合、「EBS の見え方」優先であるから、誤り可視化属性がその誤り可視化条件を満たすような誤り可視化状況は、上記の手順に従属して決まるものである。

4. 4. 2 「EBS の見せ方」優先の EBS の設計アルゴリズム

「EBS の見せ方」優先の場合の EBS の設計アルゴリズムを図 4. 5 に示す。4. 3. 2. 2 節でも述べたように、「EBS の見せ方」の視点を選択した場合でも、変動対象属性の局所的優先順位とパラメータ変動手法の局所的優先順位とが競合する可能性が残されている。この競合を解消するために、筆者は学習者に関する情報、および問題・誤り例とを索引とした事例ベースの併用を考えている。すなわち、学習者毎にどちらを優先する傾向があるかの情報を蓄積した学習者モデル、および過去に同じ問題・誤り例に対してどちらを優先するのが効果的であったかを蓄積した事例ベースから、変動対象属性とパラメータ変動手法のどちらを優先するかを決定するというものである。

そのような情報に基づく判断の結果、変動対象属性を優先する場合には、(少なくとも誤り可視

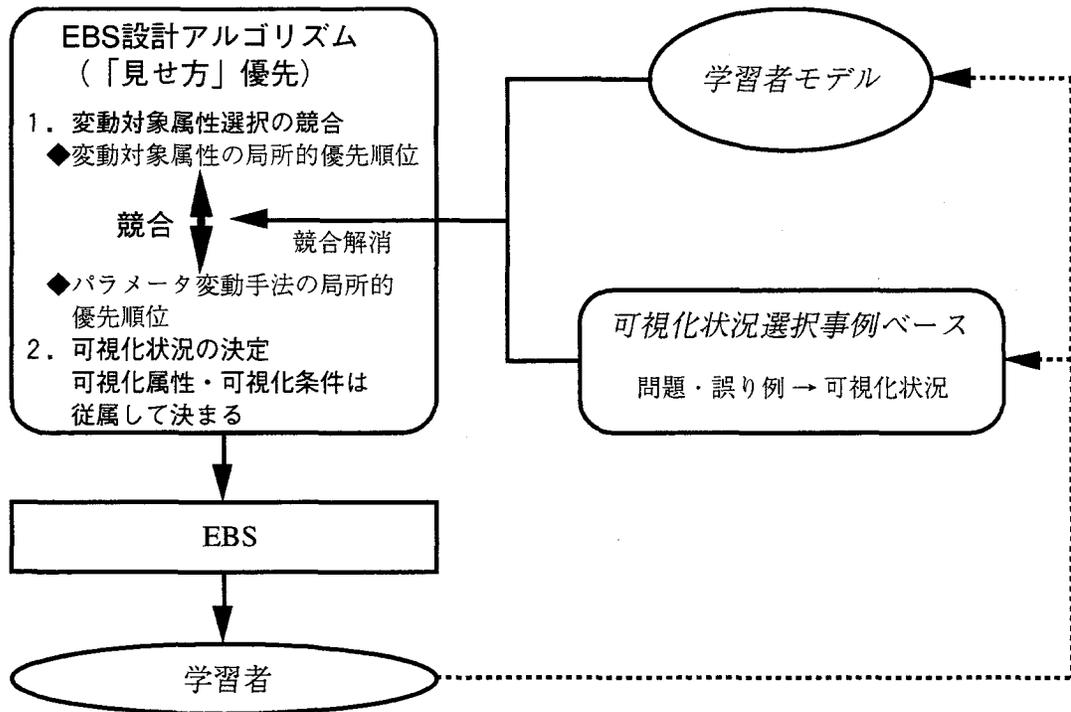


図 4. 5 「EBS の見せ方」優先の EBS 設計アルゴリズム

化条件のどれかを満たす) その局所的優先順位の最も高いものを変動対象属性として選択し、それに対してパラメータ変動を加える。また、パラメータ変動手法を優先する場合には、(少なくとも誤り可視化条件のどれかを満たす) その局所的優先順位の最も高いものを満たす物理量を変動対象属性として選択する。

この場合、「EBS の見せ方」優先であるから、誤り可視化状況がその誤り可視化条件を満たすような誤り可視化属性は、上記の手順に従属して決まるものである。

4. 4. 3 統合的な EBS の設計アルゴリズム

4. 4. 1 節および 4. 4. 2 節で述べた、「EBS の見え方」優先および「EBS の見せ方」優先それぞれの場合の EBS の設計アルゴリズムを統合したものを図 4. 6 に示す。システムは EBS 設計アルゴリズム本体、学習者モデル、視点決定事例ベース、可視化属性選択事例ベースおよび可視化状況選択事例ベースから成っている。

EBS 設計アルゴリズム本体では、まず「EBS の見え方」あるいは「EBS の見せ方」のどちらかの視点を決定する。そのためには、学習者に関する情報、および問題・誤り例とを索引とした事例ベースの併用を考えている。すなわち、学習者毎にどちらの視点を優先する傾向があるかの情報を蓄積した学習者モデル、および過去に同じ問題・誤り例に対してどちらを採用するのが効果的であったかを蓄積した視点決定事例ベースから、どちらの視点を採用するかを決定するというものである。視点が決定された後、EBS 設計アルゴリズム本体は「EBS の見え方」優先アルゴリズムまたは「EBS の見せ方」優先アルゴリズムに分岐し、前述の手続きに従って EBS を生成する。

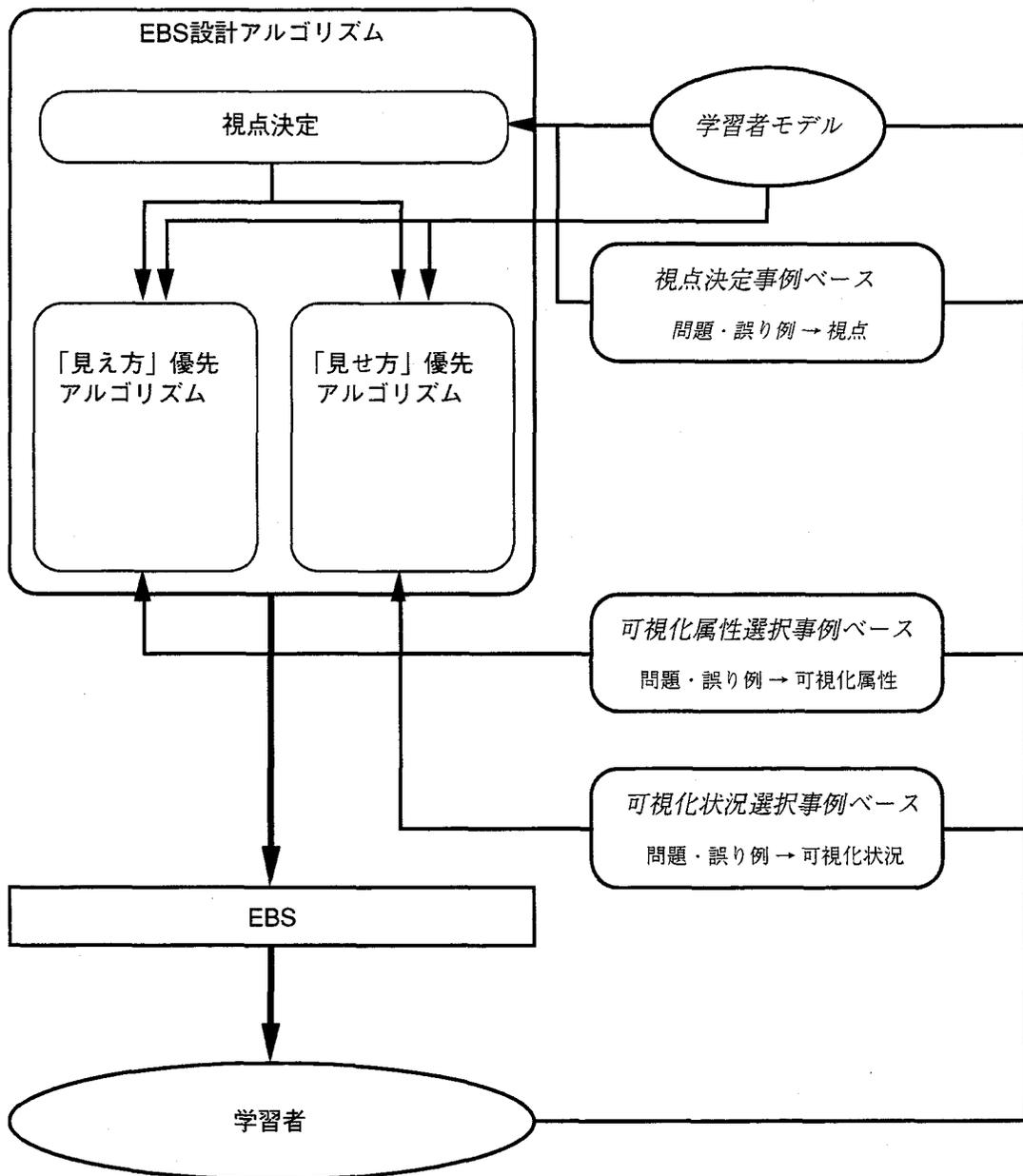


図 4. 6 統合的な EBS 設計アルゴリズム

可視化属性選択事例ベースとは、4. 4. 1 節で述べた、誤り可視化属性の局所的優先順位と誤り可視化条件の局所的優先順位との競合を解消して適切な誤り可視化属性を選択するために用いられる事例ベースである。また、可視化状況選択事例ベースとは、4. 4. 2 節で述べた、変動対象属性の局所的優先順位とパラメータ変動手法の局所的優先順位との競合を解消して適切な誤り可視化状況を選択するために用いられる事例ベースである。

本アルゴリズムに従って設計・生成された EBS は学習者に提示され、その結果は学習者モデルおよび各事例ベースに蓄積される。

4. 5 結言

本章では、第 3 章において提案した EBS による誤りの可視化、およびその効果の診断・制御手

法をより一般的な問題および誤答例に拡張すべく、EBSの誤り可視化効果を決定する諸要因を「誤り可視化属性」、「誤り可視化条件」、「誤り可視化状況」として抽出し、それぞれの特性を分析してEBSの構造を明らかにした。また、それに基づいて統合的なEBSの設計アルゴリズムを提案することにより、単にEBSの適用範囲の拡大のみならず、EBSによる統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現へ向けての展望を得た。

今後の課題としては、まず本アルゴリズムに基づくEBSによる統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実装、ついでそのシステムを用いて本章におけるEBSの構成要因に関する議論を検証することなどが挙げられる。

第5章

結論

本章では、本研究によって得られた成果を総括し、今後の課題について検討する。

第2章では、定式化されない知識の代表的な例として歴史を取り上げ、そのような分野においても人間-計算機間の高度なコミュニケーションを実現することが可能であることを、マルチメディアを用いた適切なツールを備えたシステムを設計・開発することによって示した。本研究においては、まず定式化の難しい歴史科目の教育上の困難が、主に歴史事象間の関係付け、すなわち歴史の知識構造化の難しさにあると分析した。そして、歴史の知識を適切に表現する視覚メディアとして意味ネットワークおよび属性-属性値リストを提供し、学習者とシステム間の双方向のコミュニケーションを実現することでこの困難が解消できるとの考察の下に、システムの設計・開発を行った。本システムにおいては、学習者は提供された視覚化ツールを用いて自己の既有知識を外化することにより知識間の関係を明示的に捉えることができ、またシステムにとっても、このように学習者の知識が視覚的に表されることにより、その知識状態を詳細に把握・診断できるという効果もたらされる。さらに本システムは、その視覚化ツール上で適切に制御された説明を提示し、学習者が自ら知識間の関係を推論することで知識の構造化を促進する。本システムを計算機上に実装して評価実験を行い、その有効性を実験的に検証した。すなわち、歴史のような定式化されない知識を対象とする分野においても、マルチメディアを用いた適切なツールを用いることによって、人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションが実現される一つの可能性を示したと言える。

第3章では、システムが提示するマルチメディアが学習者にどのような効果をもたらすかを予め診断・制御した上で運用することが、マルチメディアを真に有効に利用するために必要であるとの考察に基づき、力学における挙動シミュレーションの分野において、それが効果的であるための条件の定式化およびその診断・制御手法の提案を行った。まず、力学において運動方程式上の誤りを挙動シミュレーション上に反映するEBS (Error-Based Simulation) を用いた誤り可視化の枠組みについて概説した後、EBSが誤り可視化に効果的であるための条件を、それが正規の挙動シミュレーションとの間に定性的差異を持つことであるとした誤り可視化条件として定式化した。その上で、EBSがこのような可視化条件を満たすかどうかを診断する機能を定性推論の技法を用いて実現する手法を提案し、本手法を用いて計算機上に実装されたEBSの診断・制御機能が

幾つかの誤り事例に対してEBSの効果的な運用に対して有効であることを実験的に確認した。このようにして、挙動シミュレーションという視覚的メディアに限ってではあるが、メディアの持つ性質を分析してその効果を定式化することにより、それが学習者に与える効果を見積もった上での効果的な運用が可能となることを示した。

第4章では、マルチメディアが学習者に与える効果を見積もった上での運用の高度化のため、第3章で得た知見に基づいて、EBSによる誤り可視化の高度化を目指し、EBSの視覚的効果のより詳細な要因の抽出・分析、また新たな視覚的表現方法の導入の検討を行った。これによってEBSの誤り可視化効果を決定する諸要因とその構造、すなわち3つの可視化要因および要因同士の競合関係とそのEBSの誤り可視化効果への影響が明らかとなり、統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現へ向けての展望を得た。

以上の諸研究から得られた知見は、視覚的メディアに基づく円滑なコミュニケーション機能を有し、かつその効果を見積もることにより適切な視覚的メディアの運用を行う知的教育システムを実現するための指針を与えるものであり、これはマルチメディア技術を積極的に利用して人間-計算機間の高度なコミュニケーションを実現する知的教育システムの設計・開発のために大きな貢献をするものであると期待される。

最後に、今後の研究課題を二つ挙げておく。一つは第2章の研究に関するもの、もう一つは第3章および第4章の研究に関するものである。

第2章における研究に関する今後の課題としては、同章で述べた諸課題に加えて、意味ネットワークを用いた知識表現をより洗練することが挙げられる。現在のシステムでは、歴史事象間の関係リンクは時間順序のみに限られているが、これを例えば因果関係など、より定式化の難しい他の関係リンクに拡張することにより、学習者-システム間で伝達される情報量の質が向上すると共に、本システムの歴史以外の分野への適用が期待される。これは定式化されない知識を対象とする分野における、人間-計算機間の高度な双方向のコミュニケーションを実現する統合的な方法論構築への可能性を持つという意味で、有意義な研究であると考えられる。

第3章および第4章における研究に関する今後の課題としては、第4章において提案したシステムの実装が挙げられる。第3章で得られた知見に基づいた考察の結果、EBSの誤り可視化効果を決定する諸要因とその構造が明らかとなり、統合的な誤り可視化シミュレーション環境の実現へ向けての展望が得られたが、それをシステムとして計算機上に実装し実験的に検証することは不可欠の課題であると考えられる。第4章でも述べたように、実装のための技術的な問題点に関しては既存の定性推論技法を用いることで解決可能であるため、同章において設定した、挙動シミュレーションが学習者に与える効果に関する種々の仮定の妥当性を検証することが主な課題である。

このような研究を行うことにより、知的教育システムにおいてマルチメディアを真に有効に利用するために、それが学習者に与える効果を精密に見積もった上での運用を可能にするための指

針が得られるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、大阪大学産業科学研究所 豊田順一教授の御指導のもとに大阪大学大学院工学研究科 応用物理学専攻博士後期課程において行われたものであります。研究の遂行にあたり、終始懇切なる御指導、御援助を賜りました豊田順一教授に心より深謝いたします。

また、本論文作成にあたり詳しくご検討いただき、懇切な御教示、御指導を賜りました大阪大学工学部応用物理学専攻 樹下行三教授、伊東一良教授に心から感謝いたします。

本論文の審査を通して有益な御教示と御示唆を賜りました大阪大学工学部応用物理学専攻 興地斐男教授、志水隆一教授、中島信一教授、増原 宏教授、河田 聡教授、八木厚志教授、石井博昭教授、後藤誠一教授、岩崎 裕教授、ならびに萩行正憲教授、および大阪大学工学部物質・生命工学専攻 一岡芳樹教授、川上則雄教授に厚く御礼申し上げます。

種々の面で御助言、御援助を頂きました大阪大学産業科学研究所 北橋忠宏教授、元田浩教授、ならびに溝口理一郎教授に深謝いたします。

本研究の遂行にあたり、有益な御討論、御助言を頂きました大阪大学産業科学研究所 豊田研究室 平嶋宗講師、柏原昭博助手、ならびに溝口研究室 池田満助手に心から感謝いたします。

また在学中、熱心に御討論頂きました松田憲幸氏をはじめとする豊田研究室各位、ならびに種々の面でお世話になりました向井佐江子嬢に感謝申し上げます。

最後に、終始暖かく見守り励ましてくれた両親に感謝いたします。

参考文献

- [石塚 93] 石塚満: "メディアとA Iの融合", 人工知能学会誌, Vol.8, No.6, pp.717-720 (1993) .
- [石本 94] 石本佳孝, 金西計英, 森本由香, 矢野米雄: "地理学習を支援するITSの構築—説明による学習者の理解状態の表現について—", 信学技報, ET93-125, pp.9-16 (1994) .
- [植野 93] 植野雅之, 早野秀樹, 藤井研一, 対馬勝英: "対話型物理教育環境IPEの開発", CAI学会誌, Vol.10, No.2, pp.43-54 (1993) .
- [宇佐美 88] 宇佐美信, 大下眞二郎: "社会科における発見的学習のためのCAI", 信学技報, ET87-9, pp.19-24 (1988) .
- [大槻 88] 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, Vol.29, No.11, pp.1255-1265 (1988) .
- [大槻 93] 大槻説乎: "発見的学習とその支援環境", 人工知能学会誌, Vol.8, No.4, pp.411-418 (1993) .
- [大槻 96] 大槻説乎: "学習環境に対するA Iとマルチメディア技術のインパクト", 第31回人工知能セミナー講演テキスト, pp.2-11 (1996) .
- [岡本 95] 岡本敏雄: "教育とメディアと人工知能", 人工知能学会誌, Vol.10, No.3, pp.361-367 (1995) .
- [加藤 91] 加藤誠巳, 中篠有規, 飯島由紀久: "マルチメディアを用いた日本史ハイパー辞典", 信学技報, ET91-28, pp.31-36 (1991) .
- [杉山 87] 杉山肇, 小林福太郎, 渥美文: "歴史学習における学習技能開発のための指導と評価", 信学技報, ET87-7, pp.1-6 (1987) .
- [瀬戸 95] 瀬戸賢一: "メタファー思考", 講談社 (1995) .
- [西田 89] 西田豊明編: "特集「定性推論」", 人工知能学会誌, Vol.4, No.5, pp.495-555 (1989) .
- [西田 93] 西田豊明: "定性推論の諸相", 朝倉書店 (1993) .
- [西田 94] 西田豊明, 安西祐一郎編: "特集「図による推論」", 人工知能学会誌, Vol.9, No.2, pp.182-215 (1994) .
- [西林 94] 西林克彦: "間違いだらけの学習論", 新曜社 (1994) .
- [野田 95] 野田尚志, 平嶋宗, 柏原昭博, 豊田順一: "力学における誤り修正支援を目的と

したフェイクシミュレーションの提案", 人工知能学会誌, Vol.10, No.4, pp.641-646 (1995) .

- [波多野 87] 波多野和彦, 坂元昂, "歴史事象の構造と類似性を考慮した教育支援システムの開発", 信学技報, ET87-1, pp.75-80 (1987) .
- [淵 89] 淵一博 監修, 溝口文雄, 古川康一, 安西祐一郎 共編: "定性推論", 共立出版 (1989) .
- [丸山 94] 丸山裕輔, 須貝克徳: "歴史学習におけるハイパーメディア活用単元の構成", 教育工学関連学協会連合第4回全国大会講演論文集, pp.139-140 (1994) .
- [渡辺 95] 渡辺和昭, 岡本敏雄: "振り子の衝突問題を扱った定性推論システムの研究", 人工知能学会誌, Vol.10, No.4, pp.557-563 (1995) .
- [Asami 96] Asami, K., Takeuchi, A., Otsuki, S. : "Methods of Modeling and Assisting Causal Understanding in Physical Systems", Proceedings of UM 96, pp.145-152 (1996) .
- [Bielenberg 96] Bielenberg, D.R. : "Efficacy of Story in Multimedia Training", Proceedings of ED-MEDIA 96, pp.57-62 (1996) .
- [Brown 82] Brown, J.S., Burton, R.R. and de Kleer, J. : "Pedagogical, natural language, and knowledge engineering techniques in SOPHIE I, II and III", In Sleeman, D.H. and Brown, J.S. (Eds.) , Intelligent Tutoring Systems, Academic Press, London (1982) .
- [Burton 82] Burton, R. R. and Brown, J. S. : "An investigation of computer coaching for informal learning activities", in Sleeman, D. and Brown, J. S. (Eds.) , Intelligent Tutoring Systems, Academic Press, pp.79-98 (1982) .
- [Collins 88] Collins, A., Brown, J.S. : "The Computer as a Tool for Learning Through Reflection", Mandl, H., Lesgold, A. (eds.) , Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, pp.1-18, Springer-Verlag, New York (1988) .
- [Devine 96] Devine, J. : "Multimedia : How INTER - Hoe ACTIVE : Do We Really Know? Concern about 'Positions' and Priorities for Action", Proceedings of ED-MEDIA 96, pp.190-195 (1996) .
- [Fox 91] Fox, B. A. : "Cognitive and interactional aspects of correction in tutoring", Goodyear, P. (Ed.) , Intelligent Tutoring System : Evolutions in Design, Teaching Knowledge and Intelligent Tutoring, Albex Publishing Corporation, pp.149-172 (1991) .
- [Gagne 85] Gagne, E.D. : "The Cognitive Psychology of School Learning", Foresman and Company, Glenview Illinois (1985) .
- [Glynn 91] Glynn, S.M., Yeany, R.H., Britton, B.K. (eds.) : "The Psychology of Learning Sci-

ence", Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (1991) .

- [Hirashima 95] Hirashima, T., Noda, H., Kashihara, A., Toyoda, J. : "A Simulation for Error-Reflection", Proceedings of ED-MEDIA 95, pp.336-341 (1995) .
- [Kashihara 94] Kashihara, A., Matsumura, K. and Hirashima, T. et al. : "Load-oriented tutoring to enhance student's explanation understanding - an explanation planner and a self-explanation environment -", IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E77-D, No.1, pp.27-38 (1994) .
- [Kuipers 86] Kuipers, B. : "Qualitative Simulation", Artificial Intelligence, 29, pp.289-388 (1986) .
- [Kuipers 94] Kuipers, B. : "Qualitative Reasoning : Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge", The MIT Press (1994) .
- [Laurillard 93] Laurillard, D. : "From Learning Need to Teaching Strategy : What is the Nature of Link? ", Proc. AI-ED 93, pp.12-14 (1993) .
- [Osborne 85] Osborne, R., Freyberg, P. : "Learning in Science : The Implications of Children's Science", Heinemann Publishers (NJ) Ltd. (1985) .
- [Resnick 82] Resnick, L.B. : "Syntax and Semantics in Learning to Subtract", Carpenter, T., Moser, J. and Romberg, T. (eds.) , Addition and Subtraction : A Cognitive Perspective, Lawrence Erlbaum Associate, New Jersey (1982) .
- [Self 94] Self, J. : "The role of student models in learning environments", IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E77-D, No.1, pp.3-8 (1994) .
- [Stevens 83] Stevens, A.L., Roberts, B. and Stead, L. : "The use of a sophisticated interface in computer-assisted instruction", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.3, March/April, pp.25-31 (1983) .
- [Twidale 91] Twidale, M. B. : "Improving error diagnosis using intermediate representations", Instructional Science, Vol.20, pp.359-387 (1991) .
- [VanLehn 88] VanLehn, K. : "Toward a Theory of Impasse-Driven Learning", Mandl, H., Lesgold, A. (eds.) , Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems, pp.19-41, Springer-Verlag, New York (1988) .
- [VanLehn 92] VanLehn, K., Jones, R. M. and Chi, M. T. H. : "A model of the self-explanation effect", Journal of the Learning Science, 2 (1) , pp.1-59 (1992) .
- [Weld 88] Weld, D.S. : "Comparative Analysis", Artificial Intelligence, 36, pp.333-374 (1988) .
- [Weld 90a] Weld, D.S. : "Exaggeration", Artificial Intelligence 43, pp.311-368 (1990) .
- [Weld 90b] Weld, D.S. : "Theories of Comparative Analysis", The MIT Press (1990) .
- [White 93] White, B.Y. : "ThinkerTools : Causal Models, Conceptual Change, and Science Education", Cognition and Instruction, 10 (1) , pp.1-100 (1993) .