OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	非単調推論に基づく学習者モデル構築機構に関する研究
Author(s)	河野, 恭之
Citation	大阪大学, 1994, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3075123
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

非単調推論に基づく
学習者モデル構築機構に関する研究

１９９４年１月

河　野　恭　之

内容梗概

本論文は筆者が大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程 (物理系専攻情報工学分野) 在学中に行った非単調推論に基づく学習者モデル構築機構に関する研究の成果をまとめたものであり，次の 6 章をもって構成されている．

第 1 章は序論であり，本研究の目的および工学上の意義について述べ，本研究により得られた諸成果を概説している．

第 2 章では本研究で開発されたシステムを理解する上で必要な基礎的事項について述べ，高度な学習者モデル構築システムを設計するための指針を整理している．

まず，知的教授システム (ITS) を構成するモジュールの内で学習者モデルが重要な役割を占めていることを，本研究で開発した学習者モデル推論システム THEMIS を学習者モデルモジュールとして持つ ITS の汎用フレームワーク FITS を例にとりながら示している．そして，これまでに提案されてきた様々な学習者モデル構築システムを分析しながら，学習者モデル構築システムを設計する上で本質的な視点を整理している．その上で論理プログラムの帰納推論という確固とした理論的基盤を持つモデル構築アルゴリズムを定式化すること，そしてモデル構築の場面で発生する様々な種類の矛盾を定式化の基準とすることを，THEMIS の設計指針として示す．

第 3 章では，学習者モデル構築システムの設計において考慮すべき様々な矛盾について分類·分析してそのモデル構築における取り扱いについて論じ，THEMIS の基本設計を行なっている．

学習者モデル推論アルゴリズムが扱うべき矛盾はその原因により，学習者の矛盾とモデリング仮説の矛盾の二種類に分類される．学習者の矛盾は更に，理解の変化による応答の矛盾，スリップによる応答の矛盾，それに学習者の知識の矛盾の三種類に分類される．これらの四種類の矛盾はモデル構築における取り扱い方の観点からも分類でき，学習者の知識の矛盾にあたる多重世界矛盾とそれ以外の種類にあたる単一世界矛盾の二種類に分類している．単一世界矛盾が検出された場合，学習者モデル構築システムはこの矛盾の原因を突き止めて解消することで無矛盾な単一モデルを構築する必要がある．これに対して多重世界矛盾，すなわち学習者の知識の矛盾が検出された場合，システムはこの矛盾を解消せず学習者の矛盾した知識をそのまま表現する必要がある．THEMIS においてこれらの矛盾はヒューリスティックにより分離され，HSMIS(Hypothetical Student Model Inference System) が単一世界矛盾を，MWC(Multi-World Controller) が多重世界矛盾をそれぞれ取り扱うサブシステムとして設計するという方針が示されている．

第 4 章では単一世界矛盾を扱いながら学習者モデルを構築するアルゴリズム HSMIS を定式化している．

HSMIS は帰納推論システム SMIS をモデル構築の基本アルゴリズムとし，それを de Kleer が提案した仮説推論の枠組 ATMS の上で定式化することで単一世界矛盾を検出し解消する能力を実現している．この定式化により，HSMIS は学習者の理解の変化やスリップといった学習者の矛盾に対処しながら，一階述語論理のホーン節の範囲で学習者の理解状態のモデルを構築することができる．また，単一世界矛盾のうちのモデリング仮説の矛盾を定式化することで，帰納推論アルゴリズムを明確化すると共にモデル構築過程での柔軟な振舞いを実現している．

第 5 章では，多重世界論理に基づいて学習者の知識の矛盾を定式化して知識表現を設計すると共に，この多重世界矛盾を扱うモデル構築機構を定式化している．

学習者の知識の矛盾は概念の未分化に基づくものと定式化でき，このためこの種類の矛盾に対し概念弁別木の弁別条件の欠落という形の知識表現を与えている．MWC は HSMIS を単一世界のモデル構築サブシステムとして利用しながら概念弁別木のモデルを更新することにより，学習者の知識の矛盾のモデル構築を実現している．

第 6 章では本研究で得られた主な成果をまとめ，今後に残された問題を検討している．

関連発表論文

A. 学会誌掲載論文

[A1] 河野, 時森, 池田, 野村, 溝口: 非単調性の定式化に基づく学習者モデル構築方式, 人工知能学会誌, Vol.8, No.4, pp. 488-498, **1993**.

[A2] Y.Kono, M.Ikeda and R.Mizoguchi: An Inductive Student Modeling Method which Deals with Student Contradictions, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.**E77-D**, No.1, **1994**(掲載予定).

B. 国際会議発表論文

[B1] Y.Kono, M.Ikeda and R.Mizoguchi: To Contradict is Human –Student Modeling of Inconsistency–, In C.Frasson, et al. (eds.), *Intelligent Tutoring Systems*, Second International Conference, ITS'92 Proceedings, Montréal, Canada, pp. 451-458, Springer-Verlag, **1992**.

[B2] Y.Kono, M.Ikeda and R.Mizoguchi: A Modeling Method for Studnts with Contradictions, In *Proceedings of World Conference on Artificial Intelligence in Education* (AI-ED 93), Edinburgh, Scotland, pp. 481-488, **1993**.

[B3] M.Ikeda, Y.Kono and R.Mizoguchi: Nonmonotonic Model Inference –A Formalization of Student Modeling–, In *Proceedings of 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (IJCAI'93), Chambery, France, pp. 467-473, **1993**.

C. 研究会

[C1] 河野, 溝口: 矛盾した理解状態を表現する学習者モデルの構築, 情報処理学会研究報告, 90-CE-13, pp.53-60, **1990**.

[C2] 河野, 時森, 池田, 野村, 溝口: ITS のための汎用フレームワーク FITS における学習者モデル構築, 人工知能学会研究会資料, SIG-HICG-9103, pp.41-48, **1992**.

[C3] 河野, 池田, 溝口: 学習者モデル構築における矛盾の認識とその教育への利用について, 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9203, pp.47-54, **1992**.

D. 全国大会発表

[D1] 河野, 池田, 溝口: 知的 CAI における学習者モデル構築 –帰納推論・一貫性管理の高速化とその評価–, 人工知能学会第 3 回全国大会論文集, pp.761-764, **1989**.

[D2] 河野, 溝口: 多重性を持つ概念空間を扱う教育モデル, 人工知能学会第 4 回全国大会論文集, pp.683-686, **1990**.

[D3] 河野, 池田, 溝口: 学習者の思考における矛盾の分類とその教育への利用, 人工知能学会第 5 回全国大会論文集, pp.857-860, **1991**.

[D4] 河野, 池田, 溝口: 学習者の思考における矛盾を扱う ITS, 教育工学関連学協会連合第 3 回全国大会論文集, pp.293-294, **1991**.

[D5] 河野, 池田, 坂根, 野村, 溝口: 知的教育システムのための汎用フレームワークの開発, CAI 学会第 17 回全国大会論文集, pp.147-150, **1992**.

E. その他

[E1] 池田, 奥畑, 河野, 野村, 溝口: ITS のための汎用フレームワークの設計と実現, 情報処理学会 教育におけるコンピュータ利用の新しい方法シンポジウム報告集, 89-9, pp.113-121, **1989**.

[E2] 時森, 野村, 河野, 溝口: 仮説型学習者モデル推論システム HSMIS, 平成元年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G267, **1989**.

[E3] 時森, 野村, 河野, 溝口: 学習者モデル構築のための質問戦略について, 人工知能学会第 4 回全国大会論文集, pp.679-682, **1990**.

[E4] 時森, 野村, 河野, 池田, 溝口: 学習者モデル構築における対話管理機構, 人工知能学会第 5 回全国大会論文集, pp.853-856, **1991**.

[E5] 時森, 野村, 河野, 池田, 溝口: 知的な対話管理に基づく学習者モデル構築, 教育工学関連学協会第 3 回全国大会論文集, pp.419-420, **1991**.

[E6] 時森, 野村, 河野, 池田, 溝口: ITS のための汎用フレームワーク FITS における対話管理メカニズム, 情報処理学会研究報告, 91-CE-19, pp.25-32, **1991**.

[E7] 杜, 河野, 池田,Tijerino, 溝口: エキスパートからの知識獲得を支援する ITS –問題解決モデル形成支援のための知識–, 人工知能学会第 6 回全国大会論文集, pp.763-766, **1992**.

[E8] 坂根, 野村, 河野, 池田, 溝口: 知的 CAI のための教育行動決定知識の整理, CAI 学会第 17 回全国大会論文集, pp.279-282, **1992**.

[E9] 坂根, 島崎, 野村, 森広, 河野, 池田, 溝口: ITS におけるスケジューリング知識ベース構築方法論について, 人工知能学会研究会資料, SIG-IES-9202, pp.11-20, **1992**.

[E10] 室谷, 坂根, 野村, 河野, 森広, 池田, 溝口: ITS のための教育行動決定知識記述について, 平成 4 年電気関係学会関西支部連合大会論文集, G265, **1992**.

目 次

第 1 章　序論 1

第 2 章　知的教授システムと学習者モデル 5

2.1 緒言 5

2.2 FITS:ITS のための汎用フレームワーク 6

2.3 学習者モデル 7

2.3.1 分析的なモデル構築手法 10

2.3.2 帰納的なモデル構築手法 11

2.4 学習者モデル構築システム THEMIS の設計方針 14

2.5 結言 17

第 3 章　学習者モデル構築における矛盾 19

3.1 緒言 19

3.2 学習者の知識の矛盾 20

3.3 矛盾の分類 22

3.4 矛盾の種類の判別 24

3.5 矛盾を取り扱う学習者モデル推論システムの設計 25

3.6 結言 27

第 4 章　単一世界における非単調モデル構築 29

4.1 緒言 29

4.2 学習者モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS 30

4.3 帰納推論の効率化 35

4.3.1 精密化グラフの探索戦略 35

4.3.2 モデル構築対象知識の動的遷移 36

4.3.3 話題の遷移に応じた出題制御 38

4.4 ATMS を利用した問題解決 38

4.5 帰納推論アルゴリズムの定式化 40
4.5.1 帰納推論過程における仮定と矛盾 40
4.5.2 SMIS の推論過程 42
4.5.3 矛盾の検出と解消 43
4.6 推論制御機構の定式化 44
4.6.1 架空オラクル 45
4.6.2 メタオラクル 46
4.6.3 HSMIS の動作 48
4.7 学習者モデルモジュールの運用に関する考察 48
4.7.1 動作例 48
4.7.2 教育的な判断に基づく非単調なモデル推論の制御 50
4.7.3 学習者モデルの信頼性と非単調性の制御 51
4.7.4 学習者の理解と振舞いに適応した非単調なモデル推論の制御 . . . 53
4.8 結言 53

第 5 章 多重世界における非単調モデル推論 55
5.1 緒言 55
5.2 多重世界論理に基づく学習者の知識の矛盾の定式化 56
5.3 THEMIS:多重世界における学習者モデル推論 60
5.3.1 THEMIS の推論過程の定式化 61
5.3.2 矛盾の検出と解消 62
5.3.3 学習者の知識の矛盾のモデル構築 63
5.3.4 知識の矛盾の認識に基づく教育 64
5.4 考察 65
5.4.1 弁別木モデルの解釈 65
5.4.2 ドメインの性質に基づく THEMIS の探索戦略 66
5.4.3 学習者の知識の矛盾を検出する際の対話について 68
5.4.4 THEMIS の評価 68
5.5 結言 70

第 6 章 結論 71

謝 辞 75

参 考 文 献 77

図目次

2.1 ITSのための汎用フレームワークFITSの構成 8
2.2 バグ表現の種類の分類 10

3.1 未分化な概念を持つ学習者の振舞いの例 21

4.1 SMDLの基礎原子式と節の例 31
4.2 学習者モデル構築時の対話例と内部表現 33
4.3 トップレベルトレースと反駁の例 34
4.4 精密化グラフの探索戦略 35
4.5 HSMISの構成 40
4.6 メタオラクルが獲得可能な対話の例 47
4.7 HSMISの動作例 49

5.1 概念弁別木の例 56
5.2 学習者の概念の未分化を表現した弁別木の例 58
5.3 弁別木による学習者の知識の矛盾のモデル化の例 59
5.4 THEMISの構成 60
5.5 学習者の知識の矛盾をモデル化することにより可能となる教育的対話の例 64

表目次

2.1 既存のモデル構築システムの比較 15

3.1 学習者モデル構築における矛盾の分類 23

4.1 AND 演算と OR 演算の真理値表 32

5.1 THEMIS と既存のモデル構築システムの比較 69

第 1 章

序論

人類のたゆまない知的活動の結果，我々が受け継ぎまた次の世代に継承してゆく知識はますます増大している．それに伴い，また計算機の能力の飛躍的な向上とあいまって計算機に知識を蓄積して問題解決をサポートさせることへの要求は年をおって強まり，大規模知識ベースなど計算機による知識処理や知的コミュニケーションのためのインフラストラクチャが急ピッチで整備されてきている．計算機上に蓄えられて増大してゆく知識を人間にとってより価値あるものにするためには，これらの知識を人間に伝達しフィードバックする方向の流れを作り出すことが必要となってくる．このため，極めて人間的な営みである教育を遂行する能力を計算機に持たせることが求められ，知的教授システム (ITS: Intelligent Tutoring System) に関する研究が近年盛んに行なわれている．

良い教育とは知識伝達が可能な限りストレスなく歪みなく行なわれることと捉えられる．知識をストレスなく伝達するためには，伝達相手の状況を十分に認識した上でその伝達方法を決定する必要がある．計算機を用いた教育においてもそれは同様であり，いかに適切に学習者の状態を把握するかということが，把握した状況に応じて適切な教育行動を選択し実行することと共に，システムの能力を左右すると言っても過言ではない．知識伝達の対象である人間とコミュニケートして相手の理解状況を判定し，その情報をITS 内部に供給するという役割を担っているのが学習者モデルである．それが故に学習者モデル構築に関する研究はITS 研究のうちでも際だって注目を集め，また多くの努力が注がれてきた．しかし，学習者モデル構築というタスクに本質的な構造を体現し人間の教師が持つ状況の変化に対する高い柔軟性を持った学習者モデル構築システムの堅固なアーキテクチャは未だ提案されていない．

一般に汎用性と柔軟性はトレードオフの関係にある．あるタスクについてドメインに

汎用な枠組を構築することで，さまざまなドメインにおいてシステムを構築することが容易になるだけでなく，そのタスクに本質的な理論的基盤をうちたてることができる．しかし強固な汎用メカニズムを設定すればするほどノイズに弱い，動作が柔軟性に欠けるなどの副作用に悩まされることになる．この問題に対する一つの解答はドメイン固有の知識を導入することである．ドメインの性質を反映したきめの細かい知識を十分に用意できる領域では，その導入によりシステムの柔軟性を達成することは可能である．しかしその結果としてタスクの本質的な構造が見失われることが多く，ドメイン依存知識を導入する際には系統的な検討が必要である．

この問題に対するもう一つの解答は，要求される柔軟な意志決定の枠組を汎用な制御メカニズムとして定式化してアーキテクチャ自体に組み込むことである．この方法論を可能な限り適用することによって，元の枠組の優位性を失うことなくシステムに柔軟性をはじめとする能力を付加することができる．適切な制御メカニズムを確立すれば，その枠組の上でドメイン依存の制御知識を定式化することが可能となる．

以上の条件を満足する汎用な推論制御メカニズムを設計するために，以下のような人間の推論制御構造について考えてみよう．人間は推論の流れを操作し枝刈りするための様々な仮定を立てながら問題解決を行なっていると考えられる．そして，その後の過程において推論続行を阻害する要素が現れると，過去に立てた仮定を修正しながら推論の流れを制御することで柔軟でかつ一貫性を保った問題解決を可能としていると考えられる．このような問題解決の制御は，(1) 推論プロセスの各時点で様々な仮定を立てて (2) それらの仮定から推論データを導き，(3) 何らかの矛盾が検出されると (4) その原因となっている仮定の集合を修正することで矛盾を解消し，(5) 問題解決を続行する，という仮説推論の枠組を適用することで実現することができる．本研究では，学習者モデル推論に柔軟性をもたらす制御を推論プロセスの各時点において立てる仮定の間の矛盾とその解消として捉えてメカニズムを定式化し，汎用性と柔軟性，そして高いモデル構築能力を兼ね備えた学習者モデル構築アーキテクチャを提案する．

以下，第2章では，本研究で開発した学習者モデル推論システム THEMIS を学習者モデル構築モジュールとして持つ ITS のための汎用フレームワーク FITS のアーキテクチャに触れた後で，これまでに提案されてきた様々な学習者モデル構築システムを紹介しながら，本研究において目指す学習者モデル構築の枠組の方向性を位置付ける．

次に第3章では，学習者モデル構築システムが扱うべき矛盾を分類し，これらの矛盾を分離･検出するヒューリスティックスを整理する．学習者モデル構築において考慮すべ

き矛盾は，その原因によって

- 学習者の振舞いに起因する学習者の矛盾と，
- 学習者モデル構築プロセスに本質的なモデリング仮説の矛盾，

の二種類に分類され，またそのモデル構築における取り扱いの方法によって

- 学習者モデルを更新して解消すべき単一世界矛盾と，
- 学習者自身が矛盾していると捉えて教育に利用すべき多重世界矛盾，

の二種類に分類される．この分類に基づき，矛盾に対処することができる学習者モデル構築システム THEMIS の設計方針を整理することにする．これらの分類·整理により，第 4 章以降の章においてこれらの矛盾を扱うことのできる学習者モデル構築アルゴリズムの定式化を行なうことが可能となっている．

単一世界矛盾は，学習の進展に伴う学習者の理解の変化やスリップなどに起因して学習者の応答の集合に不可避的に現れる矛盾と，モデル推論プロセスにおいて過去に立てていた仮定が新たな応答の取得などにより成立しなくなる状況になるために発生する学習者モデル構築プロセスに本質的な矛盾からなる．この種類の矛盾は学習者モデル構築システムに矛盾の検出·解消とそれに起因する非単調な推論プロセスを要求する．そのために第 4 章では，非単調なモデル推論制御機能を持った仮説型学習者モデル推論システム HSMIS (Hypothetical Student Model Inference System) を定式化する．HSMIS ではモデル推論過程を定式化する基盤として，de Kleer が提案した仮説推論の枠組 ATMS (Assumption-based Truth Maintenance System) を導入している．帰納推論を基にアルゴリズムの定式化を行なうことで HSMIS は極めて高い教材汎用性と推論の柔軟性を兼ね備えたモデル構築システムとなっている．

多重世界矛盾は，学習者の概念の未分化に起因して学習者の知識自体に現れる矛盾である．学習者が内部に持つこの種類の矛盾を学習者モデルに表現するために，本研究では弁別木に基づいた学習者の概念分化構造の表現方式を提案する．第 5 章では，MWC(Multi-World Controller) が弁別木のモデル推論を行ない，同時に HSMIS の推論を制御することにより，単一世界矛盾と共に多重世界矛盾をも取り扱うことができる学習者モデル推論システム THEMIS を定式化する．学習者の概念分化構造をモデル化の範疇に収めることによって THEMIS は，ソクラテス式教授法のような高度な教授方略を駆動するに足る情報量を持った学習者モデルを提供することができる．

以上の成果に基づき，第 6 章では本研究を総括し今後の研究課題について述べる．

第 2 章

知的教授システムと学習者モデル

2.1 緒言

教育の目的は知識の伝達にある．知識を伝達する相手の状態に合わせて適応的な行動をとることは，円滑な知識伝達を行うための重要な要素であると考えられる．実際，優秀な教師はコミュニケーションを通じて生徒の様々な特質および状態を認識し，それを勘案した上で伝達したい知識を適切な方法で生徒に獲得させることができる．このような教師が持つ柔軟な知識伝達能力を計算機上に実現することにより知的な計算機教師を構築することが，ITS (知的教授システム: Intelligent Tutoring System) の研究目的である．

教師の能力を構成する知識は，伝達したい教材そのものについての知識，教材に対する生徒の理解状態を推定するための知識，そして理解状態に応じて適切に教材知識を伝達するための知識の三種類に大別される．計算機による教育を単なる電気紙芝居としてではなく人間の知識伝達構造を見極めた上で実現しようとして始められたITS の研究の流れにおいて，このような知識伝達の本質的なモデルが提案されて以来，これらの知識は順に教材知識，学習者モデル構築，教育戦略という形で計算機モデル化されて多くのITS に実装されている．

学習者の理解状態を正確に把握した学習者モデルを構築することは，学習者の理解に応じた柔軟な教授を生成するために必要かつ本質的な要素である．それ故に，ITS 研究において学習者モデルは最も重要なテーマの一つとなっており，バグモデル [Burton82] をはじめとする様々な学習者モデル表現および構築技法が提案されている [Wenger87]．しかし既に提案されているこれらの学習者モデルの多くは，構築が容易ではあるがモデルの構造が単純で高度な教育行動を生成するための情報を提供できない，モデル表現自体

は十分な表現能力を持っているが構築アルゴリズムがアドホックであり理論的基盤に裏打ちされていない，などの欠点を抱えており，学習者モデル構築の確固たる基盤は未だ確立されていないというのが現状である．本研究では学習者モデル構築というタスクの本質的な構造を見極めるために，仮説推論の枠組の上で帰納推論に基づく学習者モデル推論アルゴリズム THEMIS を定式化する．THEMIS は筆者が属する研究室で開発を行っている ITS のための汎用フレームワーク FITS の学習者モデルモジュールとして設計されたアーキテクチャである．なお，ある時点における教材に対する学習者の理解状態の推測を計算機上に表現したものを学習者モデルと呼ぶことにする．

生徒とコミュニケーションをとる場面においては，生徒の応答が自分の予測と異なる，生徒が以前の応答と矛盾するような新たな応答をする，などの様々な種類の “矛盾” に遭遇する．教師はこのような “矛盾” を認識してもあわてず，これらの矛盾をトリガとして “自らが持つ生徒の理解モデルを修正して矛盾を解消する”，“生徒の理解の変化を認識して矛盾を解消する”，“生徒が矛盾した知識を持っていると解釈する” などの戦略を用いて柔軟に対処することができる．優秀な教師が持つ生徒の理解状態を把握するための高度な能力を実現した柔軟な学習者モデル構築の枠組を開発するためには，適切なレベルでこれらの矛盾を定義してその解決法を設定する必要がある．本章では THEMIS を設計し定式化するための準備として，矛盾への対応の必要性をはじめとする学習者モデル構築問題において本質的な観点を挙げ，それに基づいて様々な学習者モデル構築システムを分析することで本研究を概観することにする．

2.2 FITS:ITS のための汎用フレームワーク

一般に ITS は教育すべき知識を持った教材知識モジュール，学習者の誤りを分析し記述する学習者モデルモジュール，学習者の状態の分析に基づき教授を実行する教育戦略モジュール，の三つの機能モジュールを持ち，それらを利用して人間に近い知的な教授の実現を目指している．しかしこのような単純なモデルでは教育行動の制御単位としては大きすぎ，精密な制御に基づく高度な振舞いの実現が困難である．

教師は，生徒の理解状態を判定する，同定した理解状態を分析し生徒の誤答の原因を同定する，生徒が持つ誤った知識に対する反例を与える，といった自らが持つプリミティブな教育行動の集合の中からその場面で最適なものを選択し実行することで柔軟でリアクティブな教授を実現していると考えられる．筆者の所属する研究室では，これらのモジュールを細分し適切な制御単位を設定することで教師の知的能力を計算機モデルとし

て実現するという設計方法論に基づき，教育を学習者の理解状態を表現したプログラムの合成とそのデバッグという枠組で捉えたITSのための汎用フレームワークFITSを開発してきた[池田92]．次のような手順で設計することでFITSは高い教材汎用性と柔軟性を合わせ持った枠組となっている．

1. 教師が持っているプリミティブな教育行動をそれぞれ汎化タスク[Chandrasekaran86]として同定し，
2. 各汎化タスクを実行する問題解決器をビルディングブロックとして実現し，
3. それらのビルディングブロックをスケジューリングアーキテクチャにより統合する．

図2.1にFITSの構成を示す．FITSにおいて学習者モデルモジュールと教育戦略モジュールは複数のビルディングブロック，すなわち学習者モデルインタプリタやバグ同定といったプリミティブな機能モジュールの集合体として構成されている．そしてスケジューラがそれらのビルディングブロックを統合·管理し，状況に応じて適切なビルディングブロックを起動することで教育全体の流れを制御している．本研究では，FITSにおいて学習者モデルを構築するビルディングブロックとして帰納推論を基本アルゴリズムとするTHEMISを開発した．

FITSにおいて教材知識はPrologで記述される．THEMISは問題解決時の学習者の応答を入力とし必要に応じて学習者に質問しながら，概念弁別木により表現した学習者の概念分化構造のモデルと共に，論理型言語SMDLのプログラムとして表現された学習者が持つ知識のモデルを帰納的に構築する．誤り同定，バグ分析のビルディングブロックは学習者モデルと教材知識を比較することにより学習者の誤りを同定し，またその原因となっている修正すべき知識を同定する．スケジューラは一般問題解決器SOAR[Laird87]をベースに開発されており，バグの分析結果，教材の性質や教育履歴などを元にFITSに装備されている１８個のプリミティブな教育戦略の内から適切な教育戦略を起動する[1]．

2.3 学習者モデル

知的な対話を行うためには相手の状態を認識している必要がある．対話の目的が教育ならばその必要性は増大する．学習者の理解状態を勘案した柔軟できめ細かな教育を遂

[1]スケジューラはビルディングブロックを制御単位としており，正確にはこれらの教育戦略を含む全てのビルディングブロックの内からその時点で最も適切であると判断したビルディングブロックを起動する．例えば，スケジューラが学習者の理解状態の把握が不十分であると判断した場合には，学習者モデル構築のビルディングブロックを選択し起動する．

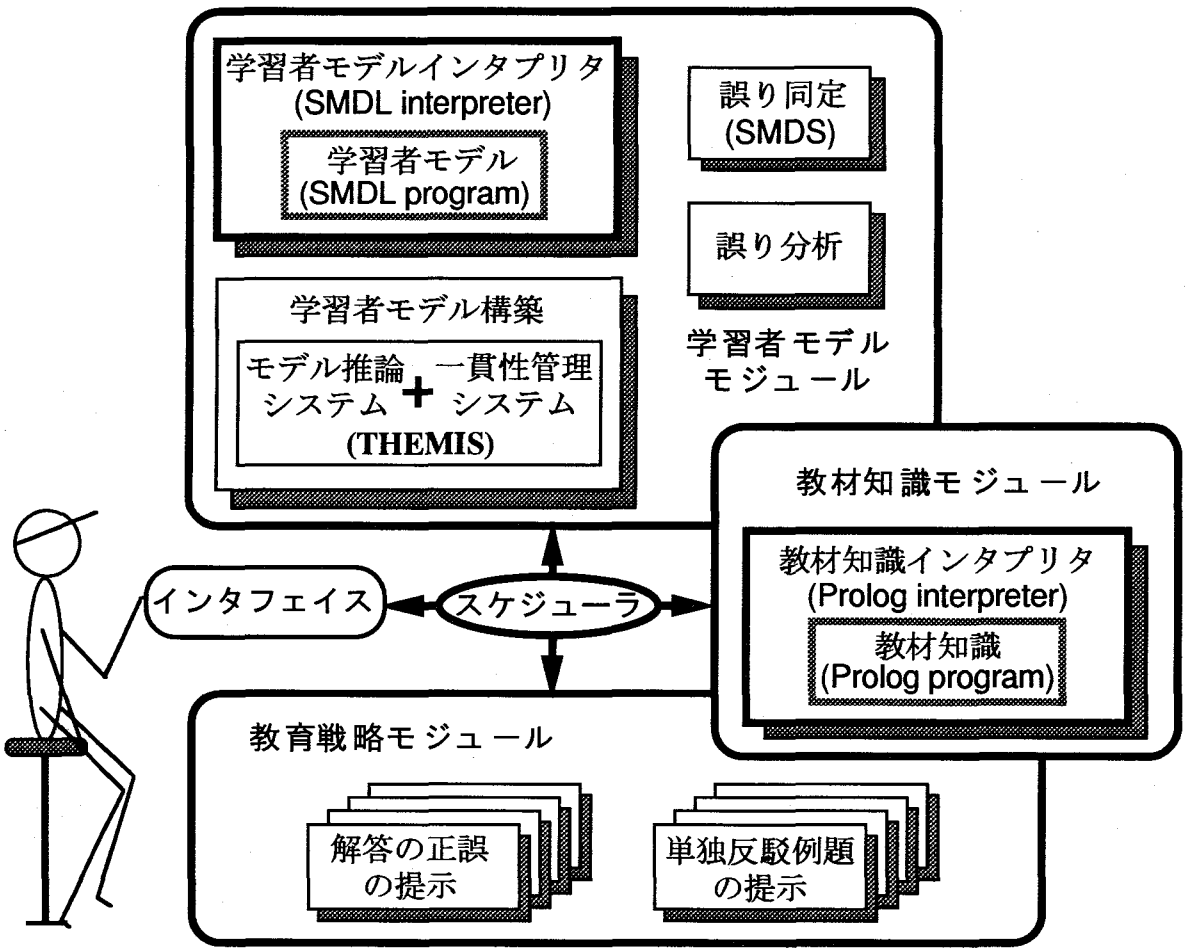


図 2.1: ITS のための汎用フレームワーク FITS の構成

行する能力を計算機上に実現するためには，学習者の理解状態を正確に把握しその情報を有効に活用する枠組が必要である．それ故に，学習者の理解を忠実に表現した学習者モデルの構築はITSの研究において最も本質的でかつ重要な要素の一つである．

一般にITSは，学習者に対して“何を”“どのように”教育するか，といったことを決定するためのデータを得るために学習者モデルを構築する．故に学習者モデルは，学習者がどの知識についてどう誤っているか，どの知識を欠落しているか，といった学習者が持つ“バグ”を表現する必要がある．“バグとは何か?それをどう表現するか?”，そして“バグをどのようにして計算機上にモデル化するか?”ということは学習者モデルの議論において極めて重要な論点である．

“バグはなぜ発生するのか?”といったバグに関する認知的な側面を重視する立場から学習者モデル構築問題を捉えようという研究が，ITSの分野では少なからずある[Wenger87]．確かに学習者モデル構築技法を検証する際には，モデルの認知的な正しさについての検討は重要なプロセスである．しかし他方，最終的に計算機の上で実現されるという性質を持つITSの仕様は計算機に実装可能な技術に大きく依存する．このため，求める表現および機能が記号的に操作可能であるかという視点が，学習者モデル構築技法を設計·評価する際に不可欠である．

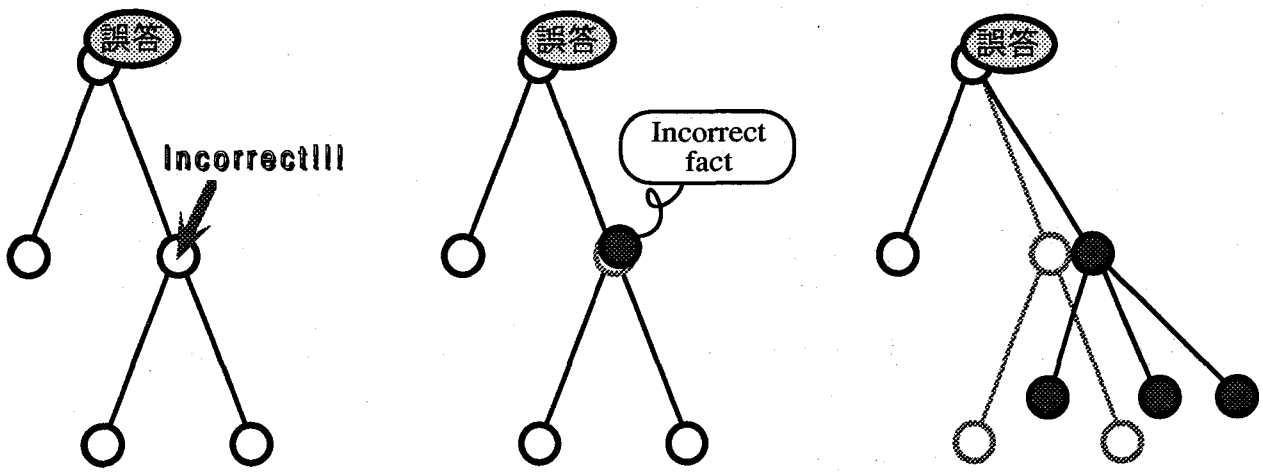
バグを記号的に表現することを考えると，記号表現可能な学習者のバグは正しい問題解決知識に対する“機能の不良(mal-function)”，すなわちある知識単位が正しくその機能を果たさない状態，と“構造の不良(mal-structure)”，すなわち知識構造自体が誤っている状態，の二種類に分類される．そしてどのように表現するかという観点から前者は更に二種類に細分化でき，学習者モデルが表現するバグには次の三種類が考えられる．

MF1(mal-function1): どの知識単位が正しい機能を発揮していないか．

MF2(mal-function2): どの知識単位が正しい機能を発揮していないか．そしてその誤っている知識単位がどのような誤りを出力しているか．

MS(mal-structure): 知識構造のどの部分がどのように誤り，その結果どのような誤りを出力しているか．

このうちMF2までしか扱えない学習者モデルは，図2.2に示すように一般に機能を果たしていない知識単位がどのような誤った回答を出力するか，ということを正解の知識構造の上で表現する．これに対してMSまで扱うことができる学習者モデルは，MF2の原因が正解の知識構造に対するどのような知識構造の逸脱から発生したか，ということま



(a) Mal-Function 1 (b) Mal-Function 2 (c) Mal-Structure

図 2.2: バグ表現の種類の分類

で表現している．

学習者の振舞いからバグを再構築する手法は大きく二種類に分類される．一つは学習者の振舞いに基づいて正しい知識を分析することにより，学習者の理解状態についての情報を得る分析的手法である．この方式では正しい知識に対応付けて推論を行なうため一般に少ない計算量でモデル構築できる反面，MS を表現するモデルを構築できないという欠点を持つ．もう一つは学習者の振舞いという観測データからその振舞いを導いた系，すなわち学習者の知識を推論するという帰納的手法である．この方式では比較的高いバグの表現能力を得ることができるかわりに設計者への負荷，もしくはモデル構築時の計算量が増大する．以降ではこれらの視点に基づいて，既に提案されている様々なモデル構築手法を概観し，その得失を検討する．

2.3.1 分析的なモデル構築手法

オーバレイモデル

一般に学習者の知識は学習の進展にしたがって増加し，最終的には教師の知識と一致する．この考え方に基づき，オーバレイモデル [Carr77] は学習者の知識状態を専門家の知識，すなわち正しい知識の部分集合として表現する．この手法では学習者の行動を専門家の行動と比較して個々の知識に評価フラグを付けるだけでよく，モデル構築システムの実現が容易である．このような使い易さの故にオーバレイモデルは GUIDON[Clancey87]

をはじめとしてITSの歴史のうえで最もよく使われている．しかしこのタイプのモデルにおいて学習者の誤りは正しい知識の欠落に起因するという仮定に基づいており，教材知識とは異なる誤った知識を持つ学習者の状態を表現できない．この方式で表現できるバグはMF1のみである．

演繹的な誤り分析モデル

Hoppeは学習者の回答をゴールとして，Prologプログラムで記述された正しい知識を演繹的に分析する手法を提案している [Hoppe93]．この方法ではEBG(Explanation-Based Generalization)を利用して正解プログラムの実行が失敗するゴールを探索することで，MF2までのバグを表現することができる．

モデルベースの分析モデル

Selfは知識工学の分野において提案された汎用故障診断メカニズムGDE(General Diagnostic Engine)[deKleer87]を適用したモデル構築システムを開発している [Self92, Self93a]．GDEは故障している可能性のある構成要素の全ての組合せを探索･検証して，故障している構成要素の集合を決定する．その際にATMS[deKleer86]を利用して枝刈りを行なうことで，効率的な故障部品の探索を実現している．学習者モデル構築にGDEの原版を適用した場合にはMF1しか表現できないが，SelfはGDEに与えるドメインモデルの各構成要素について誤り部品の概念を導入することによりMF2の表現を可能としている．

2.3.2 帰納的なモデル構築手法

学習者の振舞いから学習者の知識を推測する過程は，観測データからそのデータを導く理論を得る帰納推論のプロセスに対応付けることができる．その意味で学習者モデルの構築は本質的に帰納推論的な性質を強く持っている．にもかかわらず分析的手法に基づく学習者モデル構築システムの開発がさかんに行われていることは，帰納的手法によるモデル構築が困難な問題を伴うことを示している．それは分析的手法における正解知識のようなモデル構築における診断基準が設定しにくいため探索空間が大きくなりがちになること，よって表現プリミティブの大きさをどれだけに設定してどの程度用意するのかという基準の設定が困難であることである．帰納的手法によるモデル構築において再現できるバグの質がこの表現プリミティブの質に大きく負っているために，この問題に解を出すのが一層困難なものになっている．他方，一般に帰納的手法は分析的手法よ

りも広い範囲のバグ，すなわちMSの表現が可能である．それ故に一部の先駆者たちは帰納的手法による構築技術の開発という困難な問題に挑戦し，MSを含んだモデルの構築を目指してきた．

帰納的手法における表現プリミティブは二種類に分類される．一つはあらかじめ，そしてたいていの場合ドメイン依存に収集したバグをプリミティブとする方法である．そしてもう一つは，対象とするドメインにおいてバグを含む全てのオブジェクトを組み立てることができ，なおかつ学習者が誤ることのない知識の最小単位をプリミティブとする方式である．前者は対象とするドメインにおける全てのバグを洗い上げ分析するという大きな労力を事前に払う必要があるかわりに，モデル構築に対する計算機コストが比較的小量で済む．対して後者はボトムアップに学習者の応答を再構築するため，事前にバグを数え上げる必要がない．

バグの数え上げに基づくバグの再構築モデル

上で述べたようにバグの数え上げに基づくモデルは，対象ドメインにおけるバグを事前に収集しさえすれば比較的簡単に構築できる．そのため，Brownらが最初に提唱したバグモデル(バギーモデル)と呼ばれるこの種のモデル表現·構築方式は，オーバレイモデルに次ぐ歴史と追従研究の数を誇っている[Brown78, Wenger87]．彼らが最初に開発したシステムBUGGYは，単独のバグ手続きしか扱えないといった制限を持つものの，小学校の引算におけるバグ手続きを表現することができた[2]．

BUGGYの成果を継承して作成された学習者モデル推論システムDEBUGGYとIDEBUGGYは，正解プリミティブと事前に収集された誤ったプリミティブの集合体により学習者の誤りを再現することができた[Burton82]．またこれらのシステムは，スリップに基づく入力データ中のノイズを扱う能力を不完全ながらも持っていたが，扱えるバグはその影響が個々に抽出できるものに限られていた．一般にバグモデルを採用したシステムは，事前に収集された対象ドメインにおけるバグのグレインサイズと完全性に依存した質のモデルを比較的低コストで構築することができるが，同時にバグ収集の困難さとコストの負担を設計者に要求する．

[2]BUGGYはドメインのバグ手続きを表現することを目的としたシステムであり，例からバグを再現する能力を持っていたわけではないため厳密には学習者モデル構築システムとは言えない．

摂動モデル

一般にバグ知識は正しい知識の変種として定義することができ，そのため正しい知識に摂動操作を適用することでバグ知識を生成することができる．竹内と大槻が提唱した摂動モデルは，モデルに対する摂動操作を定義しそれを適用することでモデルを変化させる．摂動操作は，副手続きの欠落や順序違いといったドメインに対して汎用なものと，ドメイン依存のものの双方が用意される．

この方式はバグモデルのようにバグライブラリを事前に用意する必要がない．モデル表現も MF1,MF2 および MS の全ての種類のバグを表現する能力を備えており，分析的手法によるモデルやバグモデルの表現能力を包含している．しかし，摂動動作を加えて更新すべき箇所を同定するための完全性を持った一般的な手続きが定義されていないという問題がある．

ACM/DPF

Langley らが提案した ACM(Automated Cognitive Modeling)[Langley84] は，学習者の応答の集合からプロダクションルールの集合としてモデルを構築する帰納推論アルゴリズムである．各ルールの構成要素は，設定されたドメインにおいて学習者の理解状態を表現するプリミティブな知識として定義されている．ACM は用意されたプリミティブで説明可能な全ての理解状態の表現を生成することができる．このため ACM が構築するモデルの表現能力は，プリミティブのグレインサイズに依存するものの極めて高いレベルにあり，しかもバグモデルのようなバグの概念をシステム自体は持たないため事前のバグ数え上げの必要がない．しかし ACM は用意したプリミティブで張れる探索空間を完全探索するため，プリミティブのグレインサイズが不適切に小さいと探索コストが莫大になってしまう．

効率の良い探索を実現するために，Langley らは後に DPF(Dianmic Path Finder) を構築している [Langley90]．DPF では学習者がたどりがちな求解経路についての候補を定義することで，ドメインに汎用の求解経路同定器を機能させている．そして学習者が用いたルール知識をモデル化するためにヒューリスティックを用いた探索を導入している．このような枠組により DPF は，効率的なモデル構築を実現しているが，そのルール同定アルゴリズムは明確に定義されているわけではない．

PROTO-TEG

学習者モデルは教授システムが教育戦略を起動して教授を実行するための情報を提供する．このため，教授システムが要求する以上の情報量と粒度をもった学習者モデルを構築する必要はない．Dillenbourg が提案した PROTO-TEG はこのアイディアに基づいて開発された興味深い ITS である [Dillenbourg89].

PROTO-TEG は学習者モデルと呼べるほどの学習者に関する構造化されたモデルを構築しない．このシステムは，入力された学習者の行動の履歴をそのままの形で保存し，この履歴に教育行動生成ヒューリスティックスを適用して学習者に与える教育行動を直接的に導いている．通常このような枠組ではシステム設計の際にドメイン依存の教授行動生成ヒューリスティックスを収集する手間が莫大になりがちであるが，PROTO-TEG は前方探索型問題解決の制御用ヒューリスティックスを学習するプログラム LEX[Mitchel84] を用いてシステムが教授行動生成知識を学習することで，システム構築時の設計者の負荷を軽減している．

厳密には，この枠組は帰納的な学習者モデル構築を行なうわけではないが，LEX で帰納学習する教授行動生成ヒューリスティックスには本来学習者モデルとして蓄えられる情報が畳み込まれていると解釈することができる．実際，PROTO-TEG は限定されたドメインにおいて，シンプルではあるがいくつかの教授戦略を駆動した適応的な教授を実現している．

2.4 学習者モデル構築システム THEMIS の設計方針

前節において代表的な既存のシステムを概観し分析することによって，学習者モデル構築システムを評価，および設計するための重要な視点がいくつか浮き彫りになってきた．帰納的手法を分析的手法と比較すると探索空間の大きさ，プリミティブ設定の困難さという問題があるが，教師が持つ知識を捉えるうえで帰納推論は本質的なメカニズムであると考えられ，その上モデル構築システムとしての素質においてバグの表現能力の点で優位に立っている．また，設計したシステムの能力及び有効範囲を客観的に評価するためには，そのモデル構築アルゴリズムを記号的に定式化する必要がある．このため本研究では，学習者モデル推論システム THEMIS の基本アルゴリズムとして，バグの概念を持たない再構築タイプの帰納的手法を採用し，以下に示すような視点に基づいて THEMIS の設計を行ないアルゴリズムを定式化することにする．なお，ここでの議論と

表 2.1: 既存のモデル構築システムの比較

手法の名称	構築手法	MF1	MF2	MS	定式化の度合	質問生成	ノイズへの対処
オーバレイ	分析的	yes	no	no	低	—	no
[Hoppe93]	分析的	yes	yes	no	中	—	no
[Self93a]	分析的	yes	yes	no	高	yes	no
IDEBUGGY	帰納的	yes	yes	yes	低	yes	yes(不完全)
摂動	帰納的	yes	yes	yes	低	no	no
ACM/DPF	帰納的	yes	yes	yes	中	no	yes(不完全)

システムの評価を表 2.1に要約して示す.

1) 構築アルゴリズムの定式化

学習者モデル構築問題において本質的な要素を明らかにし，またシステムに組み込むメカニズムと知識の構築容易性，再利用性と拡張性を確保するためには，ドメインに汎用でかつ確固とした理論的基盤を持つ学習者モデル構築アルゴリズムを定式化することが重要な意味を持つ．しかし Dillenbourg ら [Dillenbourg92]，Huang ら [Huang91a] や Self[Self93a, Self93b] の枠組などの少数の例外を除くと，これまでに提案されてきた学習者モデル構築システムの多くはアドホックな推論手法を前提としているかあるいはドメイン依存の問題解決構造を持ち，汎用なメカニズムとして十分に定式化されているとは言えない．またそのために学習者モデル構築アルゴリズムを定式化するための方法論やシステムの評価基準についての一般的な合意が得られていないのが現状である．

確かに汎用メカニズムの定式化は困難さを伴う上に，プロトタイプの開発に至るまでに大きな労力を必要とする．また，十分に吟味されたドメイン依存のモデル構築メカニズムは一般に汎用メカニズムよりも強力に機能する．しかし，ドメイン依存の知識はそれだけではモデル構築というタスクに本質的な知識の抽出に貢献しないため，システムを拡張したり他のドメインに適用しようとすると元のシステムを構築するのとほとんど変わらないほどの労力を要することが多い．このためドメイン依存の知識を導入する際には，タスクの本質的な構造を抽出し定式化した上で系統的に検討することが望ましい．以上のような観点から本研究では，汎用な帰納推論アルゴリズムの定式化に基づき，THEMIS を設計·開発することにする．

2) 表現プリミティブの設定

学習者モデルを構築して学習者の状態を表現するためには，学習者モデルの表現プリミティブが必要である．分析的手法を用いたモデル構築システムはドメインの個々の正

解知識を，バグの数え上げに基づくシステムは収集されたバグを表現プリミティブとするのが一般的である．

THEMISのようなドメイン独立の知識再構築型アプローチをとる場合，表現プリミティブはそのドメインにおいて学習者の理解状態を表現するのに適切なグレインサイズを設定することが重要である．このグレインサイズが必要以上に細かければ，教育に利用し切れない情報を得るためにいたずらに探索し，計算資源を消費してしまうという結果に陥る．また粗すぎる場合には，教育システムが教授を遂行するために必要な情報をモデル構築システムが供給できなくなる．このため，この種のモデル構築手法においてプリミティブを設定する際には，探索空間と教育的な必要性の二つの観点を考慮する必要がある．

3) モデルの実行可能性

学習者モデルの利用方法を考慮の対象とすると，モデルの実行可能性はモデル構築手法を評価する際の大きな要素となる．学習者モデルを実行可能な形で構築することができれば，システムは学習者モデルを用いて学習者の応答を予測したり学習者の状態に応じた適切な問題を生成して出題することができるようになる．このため，実行可能な学習者モデルは教授の質を向上させることができる．THEMISでは実行可能な学習者モデルの構築を目指すことにする．

4) モデル構築に利用する例題数

一般に分析的なモデル構築システムは単一の入力例題，すなわちある一つの問題に対する学習者の応答を入力として分析し，学習者モデルを構築する．これに対して帰納的なモデル構築システムの多くは複数例題を入力データとして推論することができる．

より多くの入力例題をもとに学習者モデルを構築すれば，より信頼度が高い学習者モデルを得ることができるかわりに，学習者に対する教育的なフィードバックが遅くなりがちになる．このため学習者モデルの信頼性とシステムの反応の迅速性とは一種のトレードオフ関係にある．しかし単一例題から構築された学習者モデルを根拠とする教授行動は，それがいかに迅速であっても近視眼的，場当たり的なフィードバックとなったり，モデルの信頼性が低いために的はずれな対応になりがちである．THEMISでは，複数例題の入力データに基づく帰納推論手法によるモデル構築を行うことで，高度で包括的な教授行動を生成するためのデータを教育システムに提供することを目指すことにする．

5) モデル構築時の質問

探索条件の曖昧さや候補間の競合を解消するために，モデル構築中にシステムが学習者から正確な情報を得る必要性にかられることがよくある．しかしこれまでに提唱されたモデル構築システムのなかには，モデル構築中に学習者に対して一切質問·出題等を行わないものがある．そのためにこれらのシステムは問題を不必要に複雑にしている．モデル構築中にシステムが行う質問は，学習者にとって学習の際に与えられる問題と同等の価値がある．故に学習者モデル構築システムが行う質問は，教育的に適切な質と量の範囲内であればむしろ好ましいと言える．THEMIS ではモデル構築において曖昧さの解消に寄与し，しかも教育的に適切な質問を自動的に生成することを目指す．

6) 矛盾への対処

学習者は，(1) 学習の進展に従い理解を変化させる，(2) スリップと呼ばれるケアレスミスをおかす，(3) 自分の頭の中に矛盾する複数の知識を同時に持ってしまう，ということを原因として過去の言動と矛盾する応答をすることがしばしばある．このため，既に述べたような複数入力例題からのモデル構築を前提とするならば，モデル構築システムは入力例題間の矛盾という問題に対処する必要がある．

これまでに紹介した枠組の中では IDEBUGGY と DPF が場当たり的で不完全ながらもスリップに対応している．この入力データの矛盾という問題に本質的に対応するためには，学習者モデル構築システムが仮説推論の能力を持ちそれに基づく非単調な入力データの制御を行う必要があると考えられる．しかし仮説推論の技術を本来の意味でモデル構築に適用したシステムとしてはわずかに Huang らが提案しているのみである．彼らのシステムは ATMS を利用することで入力データの矛盾に対処しているが，取り扱える範囲は (1)(2) の矛盾に限定されている [Huang91a] [3]．これらの全ての矛盾に対処することのできるモデル構築システムが求められる．

2.5 結言

本章では，学習者モデル構築問題において本質的な観点を挙げながら，これまでに提案されてきたモデル構築システムを紹介し分析した．そしてこれらの分析に基づき，学習者モデル推論システム THEMIS の設計方針を示した．本研究では，複数例題を扱う帰

[3] Self が提案しているシステムにおいても ATMS が利用されているが，彼のシステムにおいて ATMS は診断モジュール GDE の探索空間の枝刈りに用いられている [Self93a].

納推論手法をモデル構築アルゴリズムの基礎におき，教育的に適切な質問を行ないながら実行可能な学習者モデルを構築できる枠組としてTHEMISを開発することにする．

前節で挙げたものを含むモデル構築過程において発生する様々な矛盾に重点をおき，それらを統一的に扱うことができる学習者モデル推論の枠組としてTHEMISを定式化することが本研究の最終的な目的である．この目的を達成するためには学習者モデル構築において取り扱うべき矛盾を列挙して分析する必要がある．次章ではモデル推論の場面で発生する“矛盾”に焦点を当てて更に分析·分類し，モデル構築における取り扱いについて論じる．

第 3 章

学習者モデル構築における矛盾

3.1 緒言

知識工学技術を利用した計算機アプリケーションに対して，人間の専門家と比較するとその推論が柔軟性やきめ細かさに欠ける，という批判がよくなされる．第 2 章で述べた既存の学習者モデル推論システムについても同様の批判があり，これらのシステムが教師と比較できるほどの能力をもつとは未だ評価されていないのが現状である．

教師は問題への回答やその導出過程といった学習者の振舞いを観察し，また時には学習者に質問を行ないそれを分析することで，学習者の理解状態を推察する．このプロセスは，観測されたデータからその一般記述を得る帰納推論の過程に対応付けることができる．筆者の所属する研究室では，以前から学習者モデル構築問題を帰納推論問題として定式化しその有効性について検討を行なってきたが，帰納学習 (推論) の理論を単純にこの問題に当てはめるだけでは対応可能な問題の範囲が狭くその能力も貧弱でかつ臨機応変さに欠ける，という他の AI システムと同様の欠点があるということが明らかになってきた．この問題を扱う上で極めて重要な要素となっているのが，本章の主題である “矛盾” である．

学習者は知識を獲得し定着させる段階においてしばしば一貫性のない，すなわち矛盾した振舞いを見せる．これは学習者が知識を定着し切れていない，あるいは関連する概念を形式的に理解できていないなどのため，問題解決知識を不安定に適用してしまうことがしばしばあることを示している．知識の定着過程においてこのような非単調な学習過程を見せながら，学習者は最終的に正しい確固たる知識を獲得してゆく．その知識定着の途上にある学習者の状態を明確に捉え，学習者が持つ矛盾を教育に利用できるよう

関連論文 [A2]

にすることは知識工学，教育工学の両面から極めて意義深いことであると考えられる．

一方，学習者モデル構築システムを設計する際に考慮に入れるべき“矛盾”は他にもある．学習者は学習が進むに従い自分の知識を非単調に変化させるし，時にはスリップと呼ばれるケアレスミスをする．このような場合，学習者は現在の理解状態には合致するが過去の言動と矛盾するような回答をする．このため，学習者の振舞いを一定期間以上観測するとその中に矛盾が含まれるのが普通である．

以上のように学習者モデル構築アルゴリズムが外部に想定しなければならない矛盾は，前者の“学習者が内部的に持つ矛盾”と後者の“(学習者の内部には存在しないが) 応答の履歴に見られる矛盾”の二種類に大分類できるが，それぞれの矛盾に対してシステムがなすべきことは異なっている．応答の履歴のみに見られる矛盾の場合，矛盾した応答の一方は既に学習者の信念空間の外にあると解釈するのが妥当であり，システムはその応答を無視して学習者モデルを更新することによって矛盾を解消する必要がある．これに対して学習者の内部的な矛盾については教育システムがその存在を理解してその情報を利用できるようにモデル化する方が望ましい．例えば，教育システムが学習者自身に矛盾した知識状態を認識させ，その修正をガイドするという場合には，学習者がどのように矛盾しているかということについてシステムが適切に理解している必要がある．以上挙げたような二種類の矛盾に対して適切に対処できる学習者モデル構築アルゴリズムを確立することが本研究の目的である．

本章では，学習者モデル構築で扱わなければならないこれらの“矛盾”を分類・分析し，その検出とモデル構築における取り扱いについて論じることにする．次節では，その準備として学習者が内部的に持つ矛盾について分析を試みる．

3.2 学習者の知識の矛盾

学習者がある概念の獲得段階にあり，その概念と関連する (複数の) 概念とが完全に分化し切れていない状態にあるとする．そのような学習者は分化していない概念を利用する必要がある問題を解決する際に不安定な振舞いを見せがちである．本研究における“学習者の知識の矛盾 (student knowledge contradiction)”は，外部の観察者の視点から見た場合に“矛盾”と捉えられるような学習者の状態として定義されている．この状態は次のように解釈される．

- 学習者が本来異なった概念世界に置かれているべき二つの問題解決知識を，概念世界の弁別にとって重要な属性を無視して同じ世界に置く．

(問1)
球Pが時刻t=0においてX軸正方向に19.6m/sの速度で原点を通過した.
Pは水平面上をX軸に沿って等加速度直線運動を続けt=2において停止した.Pの質量は2kgである.
t=1におけるPの位置を求めよ.
また,
Pにかかる力の方向と大きさを求めよ.
(回答)

$$a = \frac{v_t - v_0}{T_t - T_0} = \frac{0 - 19.6}{2 - 0} = -9.8 \text{ m/s}^2$$

$$S_t = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$
$$= 0 + 19.6 * 1 + \frac{-9.8 * 1^2}{2}$$
$$= 14.7$$

t=1における変位は原点から14.7m

$$F = ma = 2*(-9.8) = -19.6 \ kg \cdot m/s^2$$

左(X軸の負方向)向きに19.6$kg \cdot m/s^2$の力をPは受けている

(問2) 球Pが時刻t=0においてX軸正方向に19.6m/sの速度で水平面上の原点を通過した.
Pは一定の割合で減速しながら直線運動を続け,t=2において停止した.
t=1における変位を求めよ.
(回答)

$$S_t = S_0 + v\,t = 0 + 19.6 * 1 = 19.6$$

変位は19.6mである

(問3) ある球をt=0において19.6m/sの初速度で鉛直に投げ上げた.
その球は2秒後に最高点に達した.
t=1においてこの球が受けている力の方向を答えよ
(回答)

$$a = \frac{v_{t'} - v_0}{T_{t'} - T_0} * t + v_0 = \frac{0 - 19.6}{2 - 0} * 1 + 0$$
$$= 9.8 \text{ m/s}^2$$

t=1の時点では球はまだ上方に運動している.
故にこの時にかかっている力の方向は上向きである.

図 3.1: 未分化な概念を持つ学習者の振舞いの例

- その結果として似たような問題に対して学習者が適用する知識が不安定となり,一定の時間内に矛盾した応答をするようになる.

図 3.1に“等速度運動”と“等加速度直線運動”の概念が未分化な学習者の振舞いを示している.“等加速度直線運動”と問題文に明示された問 1 に対して,学習者は正しく球Pの変位を計算できている.しかし問 2 において,学習者は等加速度直線運動と等速度運動の概念を取り違え,等速度運動の問題解決知識を適用してしまっている.このような現象は学習者がこの二つの概念を混同しているために発生する.その結果,学習者の問題解決が不安定になる.必要な概念を正確に分化し,その弁別に必要な属性を完全に認識できている人は与えられた問題に含まれる諸概念の属性の相違に応じて問題解決知識を使い分けることができる.これに対して,未分化な状態にある学習者は問題の持つ重要な属性を見落として誤った概念のもとで問題解決を行なってしまう.

また,問 3 においては素朴概念に関わる興味深い現象がみられている.問 1 と問 3 は運動の方向が水平であるか鉛直であるかという差はあるが,物理の問題としてパラメータ化してしまえば全く同一の運動である.ところが,学習者は問 1 では物体に加わる力

を正しく計算しているにも関わらず，問3では物体に加わる力の方向を正しく求められていない．問1では公式とか定義といった物理教育の過程で学習される知識を蓄えた“定式化された世界”が意識されており，問3では学習者が幼いころから刻み込んできた素朴物理概念の世界で問題解決がなされている．この例の場合，学習者は素朴世界において“運動は力を含意する”誤概念を持っており，それが学習者の回答に影響を与えている．この誤概念は，定式化された世界における等加速度直線運動の知識と矛盾している．学習者は誤った素朴概念を適用したために力が真上に加わると答えていると解釈できる．

このように矛盾した知識を同時に持つ学習者の知識状態をモデル化するために，学習者モデルの表現に多重世界の考え方を導入する．各知識単位は少なくとも一つの世界に属し，一つの世界に属している知識には矛盾がないとする．知識を利用する際には，利用時点の状況（問題）に基づいて世界が選択されるとする．一つの概念Cは一つの世界Wに相当し，概念Cに関わる知識が世界Wに属している．二つの概念C_1とC_2が未分化な状況は，W_1とW_2という二つの世界が併合された状態，すなわち，それぞれの世界に属している知識単位がC_1とC_2の区別とは無関係に混同されている状態を表している．現在の状況から関連する概念を認識する段階は世界の弁別知識としてモデル化する．上述の例では，与えられた問題が等速度運動なのか等加速度直線運動なのかを認識する段階にあたる．このモデルにおいて学習者の回答の間の食い違いは，学習者が問題解決の際に異なった二つの世界を用いた場合に矛盾が発生するものと捉えることができる．

3.3 矛盾の分類

学習者モデル構築アルゴリズムが一般に扱うべき矛盾は，**⟨A⟩学習者の矛盾**と**⟨B⟩モデリング仮説の矛盾**に大別できる．3.1節で述べた矛盾は学習者の応答を一定期間以上観測するとその集合に含まれるものであり，ともに⟨A⟩の学習者の矛盾に属している．それらの一貫性のない振舞いはその原因によって次の三種類の矛盾に分類できる．

⟨A1⟩理解の変化による応答の矛盾: 教育の目的は正しい理解へと学習者の状態を変化させることにある．このため学習過程にある学習者の応答は本質的に矛盾する．

⟨A2⟩スリップによる応答の矛盾: 推論過程でのケアレスミスなどにより学習者の知識状態と整合しない応答が現れる場合がある．このような場合，学習者の応答の集合の一貫性は損なわれる．

表 3.1: 学習者モデル構築における矛盾の分類

(a) 原因による矛盾の分類

分類名	型
学習者の矛盾	⟨A1⟩ 理解の変化による応答の矛盾 ⟨A2⟩ スリップによる応答の矛盾 ⟨A3⟩ 学習者の知識の矛盾
モデリング仮説の矛盾	⟨B⟩

(b) 取り扱い方による矛盾の分類

分類名	型
単一世界矛盾	⟨A1⟩ 理解の変化による応答の矛盾 ⟨A2⟩ スリップによる応答の矛盾 ⟨B⟩ モデリング仮説の矛盾
多重世界矛盾	⟨A3⟩ 学習者の知識の矛盾

⟨A3⟩学習者の知識の矛盾: 学習者が矛盾した知識を同時に持つ場合，応答の一貫性が損なわれる．

モデル構築システムは，学習者モデルを推論する過程で学習者の理解状態に何らかの仮定をおくのが普通である．すなわち学習者モデルの構築過程は本質的に仮説的である．この仮説的状況は，新たに学習者の応答が得られたときに矛盾をもたらす可能性がある．このような矛盾を⟨B⟩モデリング仮説の矛盾と呼ぶ．モデリング仮説の矛盾は学習者モデル構築システムの内部状態の矛盾であり，故にその具体的な形態は対象とするモデル構築アーキテクチャに依存して設定される．

以上，学習者モデル構築において扱うべき矛盾はその発生原因によって，表3.1(a) に示すように学習者の振舞いや知識そのものの非一貫性に起因する学習者の矛盾 (⟨A1⟩⟨A2⟩⟨A3⟩) と学習者が実際に持つ知識と学習者モデルの間の不一致に起因するモデリング仮説の矛盾 (⟨B⟩) とに分類される．

次にこれらの矛盾について表3.1(b) に示すように学習者モデル構築における取扱いという観点から分類してみよう．学習者モデルが実際の学習者の理解状態と一致しないということは，それまでのモデル推論過程で立てた仮説に誤りがあったことを意味している．このような場合その不一致を取り除く，すなわち学習者の知識と無矛盾なように学習者モデルを修正する必要がある．この過程は次のような非単調な推論プロセスとなる．

1. 学習者の応答の集合に基づいて，学習者の理解状態に関して推論上必要な仮説を立て，それらの仮説集合に基づいてモデルを導出する．

2. モデルからの予測と学習者の応答の集合との間に矛盾が検出されたら，その矛盾の原因となった仮説を同定する．

3. それらの仮説に対する信念を更新することで矛盾を解消し，新たに設定された仮説集合に基づいてモデル推論を続行する．

学習者の応答を仮説とみなすことによって上記の方法論を⟨A1⟩⟨A2⟩の矛盾に対しても適用することができる．すなわち，矛盾を解消するためには学習者の“現在の”理解状態に基づいていない学習者の応答を仮説集合から取り除くことで，学習者の知識の変化に追従して学習者モデルを構築することができる．矛盾を解消し無矛盾な単一モデルを構築することによって対応する，これら⟨A1⟩⟨A2⟩⟨B⟩の矛盾を総称して，単一世界矛盾と呼ぶことにする．

一方，残る⟨A3⟩の学習者の知識の矛盾の場合は単一世界矛盾と異なり，学習者の矛盾した知識をそのまま表現する必要がある．すなわち，この矛盾は本質的には解消すべきではなく，既に述べたように多重世界の枠組で扱われるべきものである．この意味で⟨A3⟩のタイプの矛盾を多重世界矛盾と呼ぶことにする．

3.4 矛盾の種類の判別

学習者モデル構築において発生する四種類の矛盾は，矛盾の種類に関わらず一様にモデルからの応答予測と学習者の応答の相違として検出される．その相違には矛盾の種類を示唆する直接的な情報は含まれていない．このため，矛盾の種類を推定しそれに適切に対応することは，人間の教師にとっても難しいタスクとなっている．これらの矛盾の種類を適切に判定するうえでは形式的な定式化はほとんど無力であり，学習者の理解に関する何らかの先見的な情報が必要となる．矛盾の種類の推定のために必要な情報とメカニズムについての整理は現段階では厳密には煮詰められていない．THEMIS のプロトタイプシステムでは次に示す矛盾の弁別ヒューリスティックスが用意され，それにより矛盾の種類を判別している．

学習者の応答，及び学習者モデル中の各知識単位の信頼度が，対話履歴，教育/評価履歴によって設定可能という前提で，次のようにして矛盾の種類を弁別する．まず多重世界矛盾 (⟨A3⟩) を単一世界矛盾 (⟨A1⟩⟨A2⟩⟨B⟩) から分離する．

多重世界矛盾の分離ヒューリスティック (MH): 学習者の応答と矛盾する学習者モデル中の知識単位の信頼度が高い場合，その知識単位を利用するはずの類似の問題を出

題するか，あるいはもとの応答に対する確認の質問を行ない，学習者の応答の信頼度を測る．その矛盾する応答の信頼度が高い場合は，多重世界矛盾として矛盾した知識を複数の世界に分散させるようなモデルの構築を試みる．

多重世界矛盾としてモデル構築アルゴリズムが対応できる範囲は予め設定された概念構造 (素朴概念も含む) の未分化として説明できるものに限ることにする．このため MH は多重世界矛盾の可能性を示唆するものであって確定的なものではない．MH によって分離されなかった矛盾，あるいは MH によって分離されながらも多重世界矛盾として扱えなかった矛盾は，単一世界矛盾として扱われる．それらは，以下のヒューリステックによって⟨A1⟩と⟨A2⟩に細分化される．

理解の変化による応答の矛盾の分離ヒューリスティック (SH-A1): 一般に教育の成果としての理解の変化はある程度予測可能である．システムの教育的行動の成果として，期待どおりの学習者の変化 (例えば，誤答から正答への変化) が得られた場合には，その正解と矛盾する学習者の過去の応答について学習者に確認を行い，学習者が自分の理解が変化したことを認めれば過去の応答を除外する．

スリップによる応答の矛盾の分離ヒューリスティック (SH-A2): 学習者が一定の期間を通じて一貫した応答をした後の矛盾，あるいは常識的知識と照らして明白な矛盾がある場合には，スリップを検出することができる．これは MH と同様のヒューリスティックで分離することができる．

ヒューリステックが有効でない場合は，推定された矛盾原因に基づいて学習者に理解が変化したかどうかを直接質問して確かめることができる．また，以上のようなドメインに依存しないヒューリスティックスに加えてドメイン依存のヒューリスティックス，例えば“水平運動よりも垂直運動の方が運動の種類について区別しにくい” を導入することも可能である．そしてこれらのヒューリスティックスによっても学習者の矛盾 (⟨A⟩) と認識されなかったものがモデリング仮説の矛盾 (⟨B⟩) として扱われる．

3.5 矛盾を取り扱う学習者モデル推論システムの設計

本章ではこれまでに，学習者モデル構築アルゴリズムが取り扱うべき “矛盾” について，その発生原因によって学習者の矛盾とモデリング仮説の矛盾の二種類に分類し，またモデル構築における取り扱い方によって単一世界矛盾と多重世界矛盾の二種類に分類

した．そしてモデル化を前提としてこれらの矛盾の種類を判別する方法を示した．これらの分類に基づき，学習者モデル構築の場面で不可避的に発生する矛盾に対して適切に対処できる学習者モデル構築アルゴリズムを確立することが本研究の目的である．

3.3節で述べた単一世界矛盾を扱える推論プロセスを実現するうえで，de Kleer の提案による非単調推論の枠組 ATMS(Assumption-based Truth Maintenance System)[deKleer86] が仮説管理機構として有効な土台を提供してくれる．ATMS は問題解決器と独立に動作し，問題解決過程の一貫性を管理する．推論の根拠となる仮説集合とそれに基づいて問題解決器によって導かれたデータの依存関係を記録することによって，ATMS は推論過程で検出された矛盾に対してその原因である仮説集合を同定する能力を実現している．本研究で開発した仮説型学習者モデル推論アルゴリズム HSMIS では学習者モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS を ATMS の上で定式化することで単一世界矛盾を扱うことに成功している [池田89, Mizoguchi87] [1]．この定式化については第 4 章で述べることにする．

次に本研究では多重世界矛盾の定式化とそのモデル表現法の開発に基づき，単一世界矛盾と共に多重世界矛盾をも扱うことのできる学習者モデル構築システム THEMIS を設計·開発した．THEMIS は HSMIS と多重世界制御機構から構成され，その動作の概要は次の通りである．

- THEMIS の枠組において HSMIS は各世界の中で単一世界矛盾を解消し無矛盾性を保った推論を行なう．
- HSMIS が多重世界矛盾を検出すると，THEMIS の多重世界制御機構に制御を渡す．
- 多重世界制御機構は世界の混同により学習者の矛盾した応答を説明する学習者モデルを構築する．

このような機構と 3.4節で示した矛盾の種類の判別知識により THEMIS は単一世界矛盾と多重世界矛盾の両方を統一的に扱いながら学習者モデルを構築する能力を実現している．多重世界推論の定式化とその推論技術の THEMIS への統合については第 5 章で述べることにする．

このような問題を扱った研究としては Woolf ら [Woolf93] が学習者モデル構築における非単調推論の重要性を述べているほかには，Huang らによる学習者モデルの非単調性管理システムの提案 [Huang91a, Huang91b] が見られるだけである．Huang らのシステ

[1][池田89] は帰納推論アルゴリズム SMIS を定義した論文であるが，同時に HSMIS への基礎的な拡張方法も提案している．一貫性管理機構を利用してスリップに対応するというアイデア自体は [Mizoguchi87] で提案されている．

ムでは，あらかじめ学習者の信念空間に現れうる仮説を命題記号に対応づけ，学習者の各時点の知識状態を真の命題の集合で表現する．学習者の理解の変化に伴う矛盾は命題集合の非単調な変化によって説明されており，学習者の信念空間の無矛盾性は本研究と同様にATMSによって管理されている．Huangらのこのモデルは単一世界矛盾に属する学習者の応答の矛盾に対処する一手法を明確にした点で意義がある．しかし，このモデルでは教育的により重要な学習者の知識の矛盾を捉えることはできない．Huangはまた学習者の知識の矛盾を命題論理によって表現することも試みている[Huang93]．しかし，命題論理ベースでは例に基づく矛盾の表現しか可能でなく，学習者の知識を教育に利用できる記述に一般化するまでには至っていない．

3.6 結言

本章では学習者モデル構築の場面で不可避的に発生する“矛盾”を分類し，そしてモデル化を前提としてこれらの矛盾の種類を判別する方法を示した．そしてその分類に基づき，これらの矛盾を統一的に取り扱うことのできる学習者モデル推論システムの設計方針を示した．以降第4章においては，単一世界矛盾を扱う仮説型学習者モデル推論アルゴリズムHSMISを定式化する．第5章では多重世界矛盾の定式化に基づいてそのモデル表現·推論メカニズムを提示し，その枠組とHSMISを統合した学習者モデル推論システムTHEMISを提案する．

第 4 章

単一世界における非単調モデル構築

4.1 緒言

優れた教師は学習者の問題解決過程やその際の振舞いを観察することによりわずかな情報から学習者が陥っている状態を把握することができるし，学習者の内部状態の揺らぎや遷移を見抜くこともできる．本章では，第 3 章で分析した単一世界矛盾を扱う枠組を実現するために，(1) 与えられたデータ (学習者の応答) を満足するモデルを推論する過程において必要な仮定を立て，(2) それらの仮定の集合に基づいてモデルを導出し，(3) 何らかの矛盾が生じたらその原因となっている仮定を同定し，(4) 矛盾を取り除くようにそれらの仮定に対する信念を更新する，という非単調な推論手順を基本アルゴリズムとした仮説型学習者モデル推論システム HSMIS(Hypothetical Student Model Inference System) を定式化する．HSMIS は帰納推論アルゴリズムをベースに，矛盾をトリガとして仮定に対する信念の更新を行なうというプロセスを明確な形で採り入れることにより，上のような柔軟性に富んだ教師の推論プロセスを計算機モデルとして捉えることを可能とした汎用性の高い学習者モデル構築システムである．

既に述べたように単一世界矛盾には，理解の変化やスリップに起因する “学習者の応答の矛盾” とモデル推論が進むに伴い以前に立てていた仮定が成り立たなくなることで発生する “モデリング仮説の矛盾” がある．前者は外部から来るデータの矛盾，後者はシステムの内部状態の矛盾である．これらに対しては共に矛盾の原因となっている仮定に対する信念を修正することで，矛盾を解消し無矛盾な単一モデルを構築することができる．HSMIS では一貫性管理機構 ATMS を統合し，上のような非単調なモデル推論過程を実現している．

関連論文 [A1,B3]

単一世界矛盾に属する矛盾のうち，学習者の応答の矛盾に対処するためにシステムがなすべきことは，比較的明らかである．すなわち，それまでに得られた学習者の応答の集合から学習者の“現在の”理解状態に基づいていない応答を取り除き，“信頼できる”応答のみから学習者の理解状態を同定することである．これに対して，モデリング仮説の矛盾に対処する枠組を定式化するためには，モデル推論の過程においてどのような仮定を立て，どのような時にどんな矛盾が生じ，それぞれどう対処するかを明らかにする必要がある．

モデリング仮説の矛盾を定式化するにあたり目指すことは次の二点である．第一に与えられた学習者の応答の集合から学習者が持つ知識を推測するデータ駆動の帰納推論アーキテクチャを，仮定の生成とそれに基づく推論の進行，そして仮定間の矛盾をトリガとした各仮定に対する信念の更新という明確な形で定義することである．第二に，比較的少量の情報から学習者の状態を正確に把握するといった教師の洞察力に見合う推論制御機能を基本アーキテクチャに組み入れ，その振舞いを教育的観点から制御するためのメカニズムを明らかにすることである．これにより教師が持つ高い推論能力，すなわち帰納推論と柔軟な推論制御の二つの能力を合わせ持った汎用なモデル推論メカニズムを実現することができる．

以上から，本章では単一世界矛盾を扱う学習者モデル推論システム HSMIS を次のような手順で設計することにする．

1. 学習者モデル構築タスクについて完全かつ汎用な問題解決器 SMIS を構築し，その枠組の中で最大限効率化する．

2. SMIS が行う帰納推論過程を仮定の集合に発生する矛盾の検出と解消という形で定式化する．

3. SMIS の推論能力を高め，また教育的に妥当な振舞いをもたらすための単一世界矛盾を分析しそれがもたらす非単調性を挙げる．

4. それを ATMS の枠組の上で同様に定式化することで HSMIS を実現する．

4.2 学習者モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS

ここでは HSMIS のベースである帰納推論に基づく学習者モデル構築アルゴリズム SMIS[池田89] について本論文に必要な範囲で解説する．

```
temperate(japan)::true.
torrid(japan)::false.
fertile(japan)::unknown.
[日本は温暖であるが，熱帯ではない．また，日本が肥沃かどうか
わからない．]
temperate(antarctica)::false.
torrid(antarctica)::false.
wet(antarctica)::true.

grow(Plant, Place, T1) ::-
    temperate(Place, T2).
grow(Plant, Place, T3) ::-
    torrid(Place, T4),
    wet(Place, T5).
[植物は温暖な地域または湿潤な熱帯地方で生育する．]
```

図 4.1: SMDL の基礎原子式と節の例

教師は学習者の具体的な振舞いを観察し，その結果に基づき学習者の理解状態を推測するものと考えられる．このことから学習者モデル推論は，データの集合からそれを説明する一般的な記述を得る帰納推論として捉えることができる．SMIS は Shapiro が提唱した Prolog プログラムの帰納推論システム MIS[Shapiro81, Shapiro82] を基に，Prolog を拡張した学習者モデル記述言語 SMDL(Student Model Description Language) で記述された学習者モデルを帰納推論するシステムである[1]．

学習者モデル記述言語 SMDL

図 4.1に示すように SMDL は Prolog と同様に原子式と節を最小単位としている．SMDL では四種類の真理値 (true, false, unknown, fail) が定義される．true, false, unknown によってシステムから見た学習者の理解状態を表現し，fail によって学習者の理解状態が同定されていないというシステムの状態を表現する．ここで，true,false,unknown はそれぞれ学習者がある基礎原子式に対して“真である”，“偽である”，“わからない”と考えているとシステムが認識している状態である．基本的に同じヘッドを持つ節は or(∨)，ボディに並ぶ述語は and(∧) の関係にあり，SMDL におけるこれらの演算は「教師から見た学習者の理解モデル」として SMDL が一貫して機能するように定義されている．表 4.1にそ

[1]SMDL，SMIS の厳密な定義は文献 [池田89] を参照されたい．

表 4.1: AND 演算と OR 演算の真理値表

∧	true	unk.	false	fail
true	true	unk.	false	fail
unk.	unk.	unk.	false	fail
false	false	false	false	fail
fail	fail	fail	fail	fail

∨	true	unk.	false	fail
true	true	true	true	true
unk.	true	unk.	unk.	fail
false	true	unk.	false	fail
fail	true	fail	fail	fail

の真理値表を示す．この真理値の拡張により SMDL は，Prolog の論理型言語としての特徴を継承しながらより適切に学習者の理解状態を捉え，FITS の挙動の決定に必要とされる基本的な情報を表現できる．以降，SMDL の節を単に節と記述し，議論を Prolog の節に限定する場合にはそれを明記することにする．

SMDL プログラムの実行過程は弱導出と強導出の二つの手続きで定義される．前者は Prolog の実行手続きに似ており，あるゴールを真理値 Tで導出する節が一つでもあれば“そのゴールは Tで弱導出される”という．これに対して後者の場合は，あるゴールに単一化可能な全ての節を実行した結果の真理値に対する OR 演算の結果が Tであるとき，“そのゴールは Tで強導出される”という．表 4.1より明らかなように，真理値 *true* のゴールはそれを弱導出する節があれば成功するのに対して，それ以外の真理値のゴールは強導出，すなわち単一化可能な節を全て実行しなければ成功するかどうかを決定できない．例えば図 4.1のプログラムでは，ゴール `grow(japan,`T`)` は一つめの節の実行におけるサブゴール `temperate(japan,`*true*`)` が成功するだけで `grow(japan,`*true*`)` が弱導出される．これに対してゴール `grow(antarctica,`T`)` の真理値 *false* は，強導出により両方の節を実行して $false \vee (true \wedge false)$ という演算を行なうことにより求める必要がある．

SMIS

学習者との対話は図 4.2にあるように種々の形態が考えられるが，全ての対話文は SMDL の基礎原子式と真理値の組の形態に変換することができる．SMIS は図 4.1に示すような出題に対する学習者の応答の集合を導く SMDL プログラムを帰納的に合成するアルゴリズムである．本論文では，推論の根拠となる学習者の応答をオラクルと呼び，二文字組$< p(\tilde{X},T), T' >$の形式で表現する．ここで，$\tilde{X}$は変数を含まない引数の列，T'は与えられた真理値 $(T' \in \{true, false, unknown\})$, Tは真理値変数である．SMIS は全てのオラクルについてその真理値と学習者モデルの実行結果，すなわち SMDL インタプリタによる解釈が完全に一致するまで次の二つの基本操作を繰り返し実行する．

```
Does rice grow in Australia ?
>> No. [grow(rice,australia)::false]

Where does rice grow ?
>> Japan. [grow(rice,japan)::true]

Please select the coutries where rice grows.
a Japan,   b Canada,   c Australia
>> a,c. [ grow(rice,japan)::true,
          grow(rice,canada)::false,
          grow(rice,australia)::true ]
```

図 4.2: 学習者モデル構築時の対話例と内部表現
(下線部が学習者の応答)

(1) オラクルにより否定された節を取り除く.

(2) オラクルを支持するために不足している節をモデルに付加する.

SMDS

SMIS が行なうモデル修正のための二つの基本操作を適用する箇所, すなわち修正が必要となる節又はゴール, を決定するために SMDS(Student Model Diagnosis System) が起動される. SMDS は ip ,fp ,failp の三つの副手続きを持ち, 状況に応じてそれらを選択的に適用して必要ならばオラクルを要求しながら学習者モデル中で修正が必要な箇所を同定する.

オラクル $H =< p(\tilde{X}', T), T' >$ と節 $C = p(\tilde{X}, T)$::-$q_1(\tilde{X}_1, T_1), q_2(\tilde{X}_2, T_2), \cdots, q_k(\tilde{X}_k, T_k)$ があり, Cで $p(\tilde{X}', T')$ を導出する一連のオラクル$q_1(\tilde{X}'_1, T'_1), q_2(\tilde{X}'_2, T'_2), \cdots, q_k(\tilde{X}'_k, T'_k)$があるとする. これらの一連のオラクルを Hに対する Cのトップレベルトレースと呼ぶ. 図 4.3にトップレベルトレースの例を示す. この図においてオラクル $O_1, \cdots, O_6$は学習者の応答 (a) から (f) に対応し, O_2と O_3は O_1に対する Cのトップレベルトレースを構成している. そしてこのとき Cは O_1をカバーするという.

オラクル $O_7 :<$ grow(rice, kiev), true $>$が存在するとする. このとき

$O_8 :<$ suitable_temperature(rice, kiev), true $>$

$O_9 :<$ suitable_soil(rice, kiev), true $>$

の二つのオラクルがあれば, その時に限り O_7に対する Cのトップレベルトレースが完成する. しかし, O_8のかわりに $O'_8 :<$ suitable_temperature(rice, kiev), false $>$があ

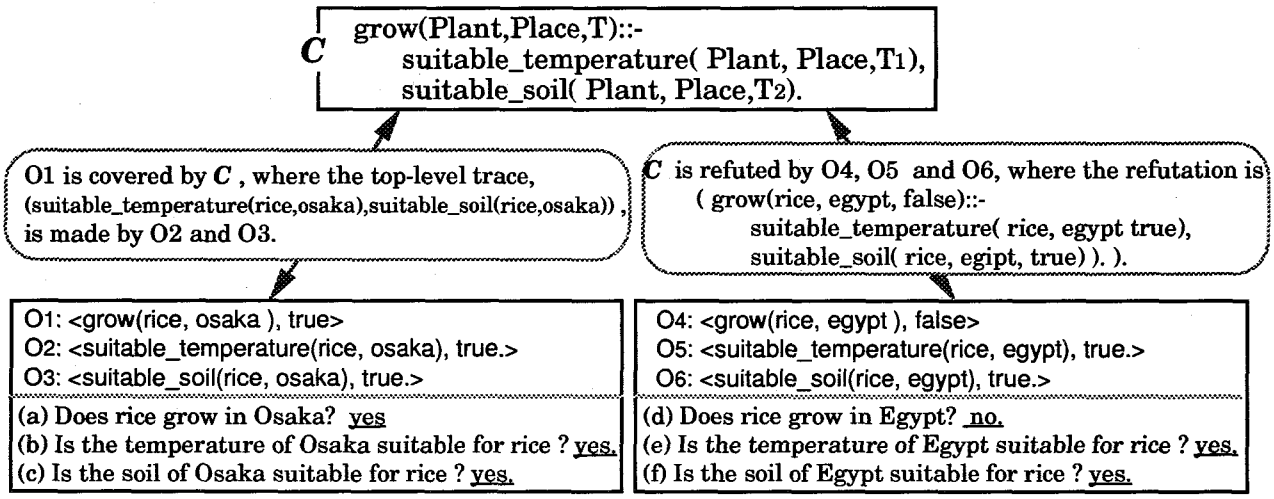


図 4.3: トップレベルトレースと反駁の例

りゴール O_7に単一化可能な他の節がモデル中になかった場合，O_7は現在のモデル Pでは弱導出されない，すなわち満足されない．このような場合，Pはゴール O_7に対して弱すぎるといい，O_7のような弱導出を持たないゴールをモデルの弱点と呼ぶ．モデルが弱すぎる場合，SMDS は弱点同定プログラム ip を起動して弱点を同定し，SMIS はその弱点をカバーするために新たな節を生成しモデルに付加する．

$T_1 \neq T_2$である真理値 T_1, T_2に対して $T_1 = T_1 \vee T_2$ なる関係が成立する時，T_1は T_2よりも強いという．あるオラクルに対応するゴールよりも強い真理値を導出する節がモデル P中に一つでもあれば，Pは強すぎるという．モデルが強すぎる場合，そのモデルには少なくとも一つの誤った節，すなわち反駁のある節を含んでいることになる．例えば図4.3では，Cはオラクル O_4, O_5, O_6により反駁されている．SMDS は強すぎるモデルの原因となっている節を fp により同定し，SMIS はその節をモデルから除去する．

あるオラクルに対応するゴールに対してモデルが $fail$を導出する場合，そのモデルは不完全であるという．モデルが不完全な場合，モデルが弱点を持つ場合と反駁のある節を持つ場合が考えられる．SMDS は failp を起動して不完全性の原因を同定する．SMIS は同定された原因に応じて節の生成·付加か，もしくは節の除去の操作をモデルに対して行なう．

精密化グラフの探索

モデルが弱点を持つ場合に SMIS がモデルに付加する節は精密化オペレータにより生成される．精密化オペレータは節を詳細化するオペレータであり，最も一般的な節 (個体を含まない基礎原子式) を基に精密化オペレータを繰り返し適用し，SMIS が持つドメイ

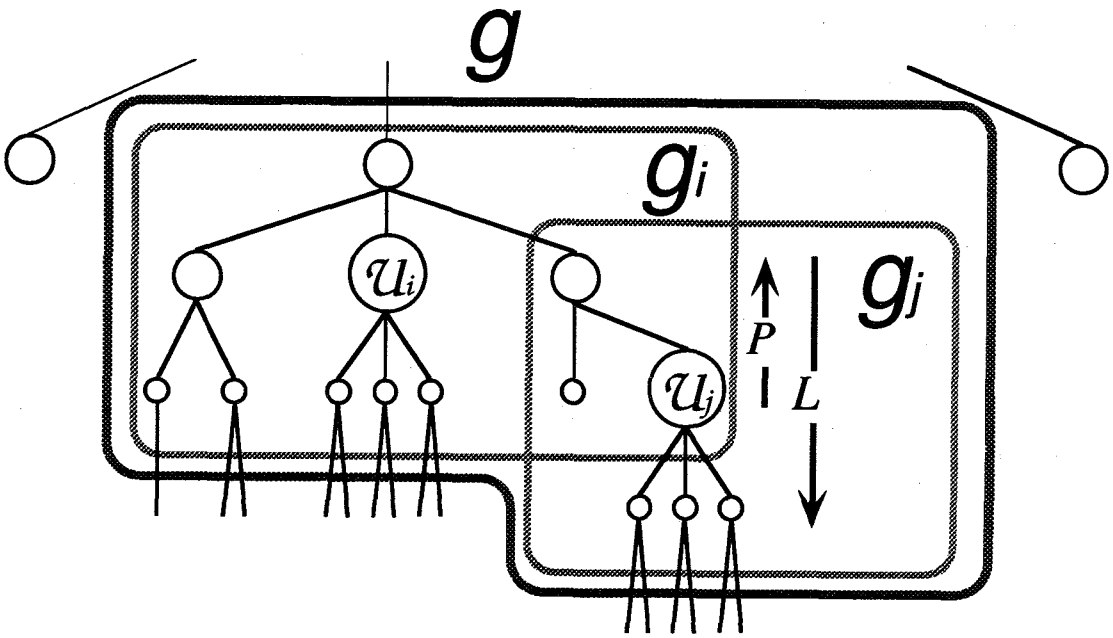


図 4.4: 精密化グラフの探索戦略

ン知識で生成可能な全節を枚挙できる．精密化オペレータの枚挙の過程を節を節点とする有向グラフとして表現したものが精密化グラフである．精密化グラフ上で節の探索を行なうと，ある節点にある節がオラクルのカバーに貢献しない場合にその子節点の探索を打ち切れるため効率的である．

4.3 帰納推論の効率化

ここではアルゴリズムの完全性を損なわずに SMIS の効率向上に寄与する手段を提案する．

4.3.1 精密化グラフの探索戦略

SMIS は精密化グラフを根から幅優先に探索することによりオラクルを満足する節を生成する．各節はグラフの節点に精密化関係を満足するように展開されている．このため，既に述べたようにオラクルの導出に寄与しない節を持つ節点の子節点についての探索を打ち切ることができる．このように SMIS は，節の精密化関係を利用して枝刈りを行ないながらグラフの根から葉へと探索を行なうことで，一般的でかつ効率的な探索制御アルゴリズムを実現している．

精密化グラフの根の付近の節のボディーは連言が少なくモデルに採用するにはもっと

もらしさに欠けることが多い．グラフの根から探索を開始すると，学習者の理解として妥当な表現の節に至るまでに多数の節点を経なければならないことになる．そこで，精密化グラフの探索を次のように行なう (図 4.4参照)．

精密化グラフ $\mathcal{G}$ とバグ知識を表す節の集合 $\mathcal{S} = \{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$，および $0 \leq P \leq L$ となる定数 P と L を与え，次のように探索グラフ集合 $S_{\mathcal{G}}$ を生成する．

1. $S_{\mathcal{G}}$ を空にする．
2. $1 \leq k \leq n$ となる全ての k について，$\mathcal{S}$ 中の節 C_k を表す精密化グラフの節点 v_k への経路長が P となるような v_k の先祖 u_k を根とし，深さが L 以内の $\mathcal{G}$ の最大の部分グラフ $\mathcal{G}_k$ を生成する．ただし，$\mathcal{G}$ の根 $u_{\mathcal{G}}$ から v_k への経路長 P_k が $P_k < P$ である場合，$\mathcal{G}_k$ は $u_k = u_{\mathcal{G}}$ を根とし深さ $L - (P - P_k)$ 以内の最大の部分グラフとする．
3. $1 \leq i < j \leq n$ となる全ての i と j について，$\mathcal{G}_j$ の根 u_j が $\mathcal{G}_i$ の節点集合に含まれる場合，$\mathcal{G}_i$ と $\mathcal{G}_j$ を併合して新たな $\mathcal{G}_i$ とし $\mathcal{G}_j$ を空グラフとする．また，$\mathcal{G}_i$ の根 u_i が $\mathcal{G}_j$ の節点集合に含まれる場合，$\mathcal{G}_i$ と $\mathcal{G}_j$ を併合して新たな $\mathcal{G}_i$ とし $\mathcal{G}_j$ を空グラフとする．
4. 一度もグラフの併合が行なわれなくなるまで 3. の操作を繰り返す．
5. $1 \leq k \leq n$ となる全ての k について，$S_{\mathcal{G}}$ に空グラフでない $\mathcal{G}_k$ を順に加える．

以上のように生成された $S_{\mathcal{G}}$ に含まれる $\mathcal{G}$ の部分グラフを精密化グラフと同様の方法で順に探索することにより，あるオラクル O を支持する節を生成しモデルに付加する．$S_{\mathcal{G}}$ の全ての要素のグラフについて探索が全て失敗した場合，$\mathcal{G}$ の探索を従来通り根から行なう．

このアルゴリズムにおける探索制御知識は，教材を定めればバグに関する情報として収集でき，その質と量に依存して推論効率を向上できる．バグ知識による探索が失敗した場合は節の探索を精密化グラフの根からやり直せば，この探索戦略は一般性を失うことはなく，ほとんどの場合節の探索効率が向上する．また，定数 P および L の値は与えられたバグ知識の性質を規定する．例えば $P = L = 0$ の場合，バグ知識だけの探索となるため学習者が典型的な理解状態をとりやすい教材において効率的な探索が可能である．P および L の値が適当に大きい場合に複数のバグ知識が近接していれば自動的に統合され，共通の祖先から探索される．

4.3.2 モデル構築対象知識の動的遷移

節の集合は，述語を節点とし，述語の呼び出し関係を枝とした有向木として見ることができる．このとき，ある述語よりも根に近い部位に位置する節点の述語は元の述語に

対し相対的に上位にあり，逆に葉に近い節点の述語は下位にあると記述することとする．SMIS のアーキテクチャでは，モデル中のある述語の正当性を検査する必要がある．すなわちモデル中でその述語よりも下位に存在する全ての節と基礎原子式の正当性を証明しなければならない．このため，ドメイン知識中で比較的上位に位置する知識についてのモデル構築を行なおうとする場合，SMIS は必然的にその知識のかなり下位にある知識に言及してしまうことになる．教師が学習者の理解状態を把握する範囲は話題になっている知識の近辺に限られると考えられる．このことからモデル構築を行なう範囲を必要に応じて動的に変化させるメカニズムを次のように設定すれば，上の問題は解決できる．

HSMIS がモデル構築を行なうべき範囲として述語の集合 $S_p = \{P_1, P_2, \cdots, P_n\}$ が与えられたとする．FITS においてドメイン知識は Prolog の節と基礎原子式の集合として記述されており，これを述語を節点とし述語の呼び出し関係を枝とした有向木 $\mathcal{T} = (V, E)$ と記すことにする．このとき，限定されたモデル構築範囲 (以降スコープと呼ぶ) は，節点集合を S_p とした $\mathcal{T}$ の部分グラフ $\mathcal{T}_s = (S_p, E_s)$ となる．E_s の要素は E の要素のうち両端の節点が S_p に含まれるもの全てとする．SMIS は $\mathcal{T}_s$ を基に精密化グラフを生成･解釈し学習者モデルを構築する．そして $\mathcal{T}_s$ において葉となる節点の述語よりも下位の述語のモデル検証を行なわない．

FITS では教育行動を決定するメカニズムとしてスケジューラが用意されている．スケジューラは HSMIS を起動する際，その問題空間としてスコープを決定し伝達する．SMIS は，モデルの実行結果とオラクルの検証をスコープの範囲に限定し，スケジューラの決定の枠内でモデル推論を行なう．スケジューラがスコープの変更を通知してモデル構築範囲が下位に広がった場合，それまで基礎原子式として扱われてきた述語についての節探索を自動的に再開することで，推論の連続性を保ちながら文脈に沿ったモデル構築を可能にしている．

モデルの検証をスコープの範囲に限定することで範囲外のモデルの完全性は保証することはできない．しかし SMDS は，学習者モデルを修正すべき部分がスコープの範囲に閉じているかどうかを同定することができる．この SMDS のモデル診断結果を保存し各節にタグを付けておくことにより，スコープ範囲外のモデルの信頼性を管理することができる．これによりモデルを利用して学習者の応答を予測する際，その予測の信頼度を計算することができる．また，スケジューラがスコープの変更を通知した場合，保存されていた診断結果を利用して即座にモデルの修正に取り掛かることができる．

4.3.3 話題の遷移に応じた出題制御

教師は観察した学習者の振舞いを全て記憶しているわけではないし，また記憶している全ての振舞いを検証して学習者の理解状態を推論するわけではない．学習者の振舞いについて疑問を抱いたとしても，教育の流れに沿わない話題についての出題は行なわない．これは教師が古い話題についての学習者の発言を無視するかあるいは忘れて，比較的新しい学習者の振舞いだけを評価対象としているためと考えられる．このような教師の振舞いを実現するために，SMIS は検証データ，すなわちオラクルの集合を話題で管理しそれを変化させることで，学習者の理解状態同定のための出題，すなわちオラクル獲得のための質問を教育的に妥当な範囲に限定するための制御を実現している．

教材知識を Prolog のような論理型言語で記述した場合，節に含まれる変数に代入し得る定数には制限がある[2]．ある変数 vに代入可能な定数の集合を vの代入域と呼び，代入域の要素を代入要素と呼ぶ．このときある変数 vとその代入要素 c の対応付け (c/v) を話題と呼ぶことにする．

SMIS は話題の集合をドメイン依存知識として与えられ，どのオラクルがどの話題に含まれるかを分類する．ある話題を (それが古い話題であるなどの理由により) モデル構築の対象から除外するという判断がなされれば，SMIS はその話題に関連するオラクルを削除する．ある特定の話題についてこのような操作をすることにより，その話題についてのオラクルをモデル検証の対象から除外し，またオラクル獲得のための質問を行なう話題を教育的に適切な範囲に限定することが可能となる．このメカニズムの運用方法については 4.7節で述べる．

4.4 ATMS を利用した問題解決

仮説推論のための一貫性管理機構 ATMS と問題解決 (推論) システムは，情報の授受によりインタラクティブに機能する別個のシステムである．推論システムはその推論過程を ATMS に通知する．推論システムが取り扱う全てのデータは ATMS が管理する．

推論システムが通知する情報は，$[N_1, N_2, \cdots, N_k \Rightarrow D]$ の形態をとり，データ Dがデータの集合 $\{N_1, N_2, \cdots, N_k\}$ から導出されたことを表す．$\{N_1, N_2, \cdots, N_k\}$ を Dの支持理由という．

[2]例えば図 4.1の植物の生育に関する述語 grow(Plant,Place,T) において，第一引数の変数 Plant には rice,wheat 等の植物名を示す定数のみ代入可能であり，変数 Place には niigata,kiev 等土地を表す定数しか代入されない．

推論システムで扱うデータは，前提データ，仮定データ，導出データのいずれかに分類される．前提データは，いかなる状況でも成立するものとして定義される．仮定データは，他のデータに依存せずに，成立すると仮定されたデータである．導出データは，他のデータから推論規則により推論されたデータである．推論システムは導出データの推論過程を ATMS に通知する．

導出データから支持理由をたどると，最終的には前提データまたは仮定データに必ず到達する．このため，全てのデータに対してそれが依存する仮定の集合を計算することができる．この仮定の集合は環境と呼ばれる．各データについて推論システムから通知された支持理由を記録し，そのデータが成立する無矛盾な環境を計算することが ATMS の主要なタスクの一つである．矛盾の導出が通知されると ATMS は矛盾の環境を計算し，それを矛盾レコードに記録する．矛盾レコードに含まれる環境は許されない仮定の組み合わせと解釈できる．

推論のある局面はコンテクストと呼ばれ，その局面で成立するデータの集合により定義される．コンテクストに含まれるすべてのノードを導出する環境の集合をそのコンテクストの特性環境と呼ぶ．ATMS は，矛盾レコードを用いて推論システムの推論過程の無矛盾性を管理する．推論システムは，矛盾レコードに記録された環境を包含しない新たな特性環境を選択し，ATMS に通知する．新たな特性環境が通知されると，ATMS はそれまでに導出された各ノードが新しい特性環境において成立する (in) か成立しない (out) かを決定し，in ノードの集合により新しいコンテクストを構成する．そのコンテクストの元で推論システムは推論を続行する．

ATMS を用いた問題解決システムにおいて特性環境を遷移することは，推論の途上でなんらかの仮定を改変することに当たる．特に，以前に立てた仮定の更新は問題空間の非単調な変更に他ならない．ATMS ベースの推論システムでは，ATMS が管理する仮定の状態を制御することで非単調な推論が実現できる．

特定の問題解決システムに ATMS を導入する際の設計上のポイントとしては，以下のことが挙げられる．

1. データの分類 (前提データ，仮定データ，導出データ) とその依存関係の設定
2. 矛盾検出ルールの定義
3. 矛盾解消器の設計

次節からはこれらの点を明確にしながら，モデル推論アルゴリズムを定式化してゆくことにする．

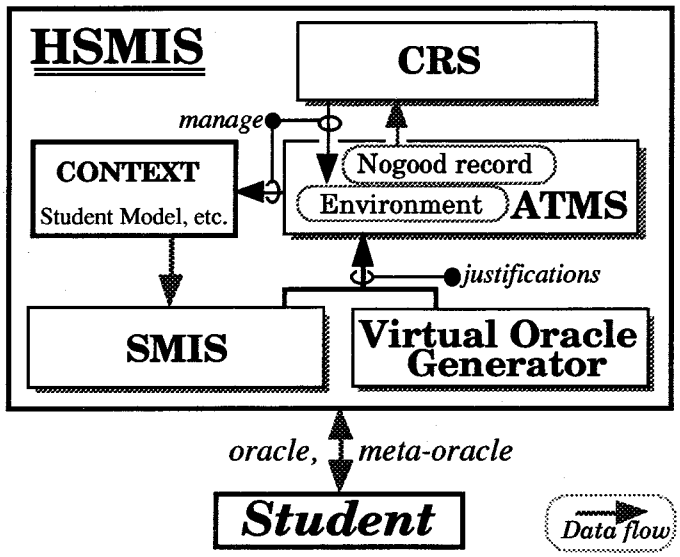


図 4.5: HSMIS の構成

4.5 帰納推論アルゴリズムの定式化

SMIS は帰納推論システムであるがその推論過程は演繹的である．すなわち，オラクルから学習者モデルを導出する全てのステップを演繹的な因果関係で結び付けることができる．また，SMIS に与えるオラクル集合を非単調に制御することで非単調性を持った学習者モデル推論を実現できる．本研究では，HSMIS において仮説推論の枠組 ATMS[deKleer86] を組み込み，それによりモデリング矛盾とそれがもたらす非単調性を統一的に定式化した．本節では，その定式化について述べる．

HSMIS の構成を図 4.5に示す．HSMIS は，(1) モデル推論エンジン SMIS，(2) 一貫性管理システム ATMS，(3) 架空オラクルジェネレータ，(5) 矛盾解消器 CRS からなる．FITS を統括するスケジューラは教育全体を見通したグローバルな観点からモデル推論範囲の大枠を決定し，学習者モデル構築システムを起動する．ATMS は SMIS が扱うデータの状態を管理しており，架空オラクルジェネレータと CRS が ATMS を通じて SMIS のモデル推論を制御する．

4.5.1 帰納推論過程における仮定と矛盾

4.2節で述べたように帰納推論アルゴリズム SMIS はモデル構築の対象となるオラクルの集合$\tilde{\Omega}$を与えれば，モデルに対する節の生成·付加と除去の二つの基本操作を繰り返して$\tilde{\Omega}$を満足するモデルを構築する．新たな学習者の言明が得られたり学習者が過去の誤りを修正したりすることなどにより，一般に$\tilde{\Omega}$は時間の経過に伴って変化する．このた

め，ある節 Cが$\tilde{\Omega}$を満足するとある時点で判断したとしても，$\tilde{\Omega}$の変化により Cに対する反駁が後に得られれば，以前の判断は成り立たなくなる．またある節 Cがあるオラクル Oをカバーできないとある時点で判断していたような場合も同様に，$\tilde{\Omega}$が変化すれば Oに対する Cのトップレベルトレースが構築できるようになることがある．以上のような SMIS の推論プロセスにおいて立てていた仮定が，$\tilde{\Omega}$の変化により成り立たなくなるために生じる矛盾を，順に**正当性の矛盾**，**カバーテストの矛盾**と呼ぶ．HSMIS においてこれらの矛盾の原因となる次の二種類の仮定が定式化されている．

Ω-consistent(C): Cがオラクル集合$\tilde{\Omega}$に対して正当である，すなわち$\tilde{\Omega}$から反駁されていないことを表現し，$\Omega\text{-}refutation(C)$ が他のデータから導出されない限り有効である．$\tilde{\Omega}$が変化すればそれに伴いモデルに採用するクローズの正当性も変化する．この仮定は$\tilde{\Omega}$の変化に追従したモデルの更新を体現している．

uncover(C',O): オラクル Oが節 C'をカバーできないことを表現し，$cover(C', O)$ が他のデータから導出されない限り有効である．精密化グラフ探索の枝刈り，およびグラフ探索失敗の検出のために利用される．

SMIS が付加する節を生成する際に精密化グラフを必ず根から探索していれば，モデルに付加する節よりも一般的，すなわち精密化グラフ上でその節の先祖のノードに位置する節には全て反駁があり，弱点を解消する節として適切なものがないことが保証されている．しかし 4.3.1節で示した精密化グラフの探索戦略を導入することにより，付加する候補の節 Cより一般的な節がその時点で全て探索されているわけではなく，後の推論において Cが最も一般的であるという仮定が成り立たなくなる場合がある．以上のような精密化グラフの探索順序により発生する矛盾を**一般性の矛盾**と呼び，その矛盾を引き起こす仮定が HSMIS において次のように定式化されている．

general(C): Cよりも一般的な節がモデル中にないことを表現し，Cよりも一般的な節がモデルに付加されない限り有効である．

一方，単一世界矛盾のうち学習者の応答の矛盾を取り扱うためには，信頼できないオラクルをモデル構築の対象から外す，矛盾の原因となっているオラクルのいくつかの真理値を変更するなど，$\tilde{\Omega}$自体を変化させることが必要となってくる．これは与えられた全てのオラクルの集合Ωから，モデル構築の対象とするオラクルの集合$\tilde{\Omega}$を生成することを意味する．このため HSMIS では，オラクル自体が仮定として定式化されている．

oracle($p(\tilde{X},T)$, T'): 基礎原子式$p(\tilde{X})$に対応する問題に学習者が真理値T'を回答したことを表現し，これが有効であることはオラクル$< p(\tilde{X},T),T' >$がモデル構築対象となっている，すなわち$\tilde{\Omega}$に含まれていることを意味する．

以降，$p(\tilde{X},T)$のような表現を単にP'と略記する．

4.5.2 SMISの推論過程

SMISが$\tilde{\Omega}$のもとで新しい節$C=(A \leftarrow B_1,B_2,\cdots,B_k)$を学習者モデルに付加する条件は次のように記述できる．

if cond1: (**oracle**(A',T) $\in\tilde{\Omega}$) and
cond2: ($\tilde{\Omega}$においてCに対する反駁がない) and
cond3: (CはA'の導出に貢献する) and
cond4: (Cよりも一般的な節がモデルにない)
then (Cをモデルに付加する)

ここで，この推論過程の記述を考える．条件部 cond1 ～ cond4 をそれぞれ次のように記述する．

cond1: 問題の定義からオラクルは仮定データ **oracle**(A',T) として表現される．

cond2:ある時点におけるオラクル集合$\tilde{\Omega}$に対するCの正当性，すなわち反駁がないことは，学習者の真の理解状態におけるオラクル集合における正当性と一致するとは限らない．このため，正当性は仮定データΩ-**consistent**(C) として扱われる．

cond3:この条件は，Cが$\tilde{\Omega}$において(A',T)の導出に貢献することを意味している．HSMISの推論過程は次の形式でATMSに通知される．

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{oracle}(A',T)\\ \mathbf{oracle}(B_1',T_1)\\ \quad\cdots\\ \mathbf{oracle}(B_k',T_k)\end{array}\right\} \Rightarrow cover(C,(A',T))$$

ここで，$T=\bigwedge_{i=1}^{k} T_i$であり，$\wedge$は表4.1のSMDLにおける論理積を表す．

cond4: Cよりも一般的な節がモデル中にないという仮定データ **general**(C) がATMSに通知される．

学習者モデル診断システム SMDS は節 C'に対する反駁の存在を同定するとそれを ATMS に通知する.

$$\left.\begin{array}{l}\textbf{oracle}(A', T_w)\\ \textbf{oracle}(B'_1, T_{s1})\\ \quad\cdots\\ \textbf{oracle}(B'_k, T_{sk})\end{array}\right\} \Rightarrow \Omega\text{-}refutation(C)$$

ここで, $T_w \neq T_w \vee \bigwedge_{i=1}^{k} T_{si}$ である.

C'が A'の導出に貢献しない場合, 正当性の記述と同様の理由で仮定データ **uncover**(C',A') として表現する.

モデルに対する Cの付加は, 以上のデータをもとに次のような形式で ATMS に通知される.

$$\left.\begin{array}{l}\textbf{oracle}(A', T)\\ \Omega\textbf{-consistent}(C)\\ \textbf{general}(C)\\ cover(C, (A', T))\end{array}\right\} \Rightarrow model(C)$$

以降の推論で, $model(C)$ の支持理由のいずれかが成立しない特性環境に遷移した場合, ATMS は $model(C)$ がその時点の推論結果として成立しないことを保証する.

4.5.3 矛盾の検出と解消

SMIS の推論過程において生じる矛盾は, 次の五つの形式で検出される.

(S1) 正当性の矛盾

if (Ω-**consistent**(C) and Ω-$refutation(C)$) **then** $\perp$

(S2) カバーテストの矛盾

if (**uncover**(C,(A',T)) and $cover(C, (A', T))$) **then** $\perp$

(S3) 一般性の矛盾

Cよりも一般的な節 C'について

if (**general**(C) and $model(C')$) **then** $\perp$

(S4) オラクルの矛盾

if (**oracle**(A',T) and **oracle**(A',T') and ($T \neq T'$)) **then** $\perp$

(S5) 節探索の失敗

if (**oracle**(A',T) を導出するために探索した全ての節について

uncover(C,(A',T)) **or** Ω-$refutation(C)$)

then $\perp$

HSMISは以上の矛盾について順に検出を行ない，何らかの矛盾が検出されるとATMSに支持理由と共に矛盾の発生を通知する．ATMSはラベル計算アルゴリズムを用いて矛盾した環境を計算し，それを記録する．CRSは3.4節で述べた矛盾の種類の判別ヒューリスティックを用いて矛盾の種類を判別する．単一世界矛盾と判定された矛盾は以下のように扱われる．

上述の5種類の矛盾のうち，(S1)(S2)(S3)は既に述べたようにモデリング仮説の矛盾に属し，その解消方法は一意に決定できる．すなわち，Ω-**consistent**(C), **uncover**(C,A)および**general**(C)は，それぞれΩ-$refutation(C)$, $cover(C,A)$, $model(C')$が“成立しない限り”成立すると仮定されたデータであるため，これらの矛盾は仮定の側を棄却，すなわちoutにすることで解消される．これらの矛盾はSMISの推論方式自体が持つ非単調性に起因するものであり，ATMSの環境遷移を用いてモデル推論の連続性を保ちながらそれまでの推論結果を効率的に利用することができる．

これに対して(S4)(S5)の矛盾は共に学習者の応答の矛盾に属し，オラクル環境矛盾と呼ぶ．オラクル環境矛盾が発生した場合，CRSはモデル構築を続行するためには全ての矛盾レコードを回避する適切なオラクル集合を探索し，新たな$\tilde{\Omega}$として設定する．この探索法については節を改め，必要な知識と運用メカニズムとあわせて4.7節で詳述する．

4.6 推論制御機構の定式化

非単調推論に基づく学習者モデル構築の枠組を利用しようとする際，その推論に非単調性を要求する要素は学習者だけではない．精緻な学習者モデルの構築には学習者に対する相応な量の質問が必要となるが，教育的観点からはモデル構築のための質問を無制限に許すわけにはゆかない．教師は学習者の振舞いが予測の範囲内であれば，その予測の根拠を信頼してあまり繁雑に質問を行なわない．そしてその後に信頼への反証が得られると，教師は以前の信頼を取り消して理解状態を同定するのに必要な出題を行なう．教師は自分が持つ教育的な経験に基づき，学習者が持っているであろう知識についての信頼を非単調に変化させることによって上のような柔軟な出題戦略を実現させていると考えられる．本節で目指すことの一つは，学習者の知識に対する信頼の非単調性を定式化しその制御機構を実現することである．そのためにここでは“架空オラクル”を導入する．

学習者が自らの知識を言明する形式には様々なものがある．これら学習者が行なう言明は，問題に対する回答を示す基礎原子式形式のものと，基礎原子式を導出する根拠となるルール形式のものの二つに大別される．SMISが入力として受け付けるオラクルは基

礎原子式形式の知識であり，その基本的な枠組では他の形式の入力を受け付けない．しかし学習者から得られる情報はそれが利用可能ならば受け付けられるべきである．本節のもう一つの目標は，HSMIS の入力の形式を拡張しそれを定式化することである．そのために“メタオラクル”を導入する．

以降，本節では SMIS のモデル推論能力を高め，また教育的に妥当でかつ柔軟な非単調性を持った振舞いをもたらすことに寄与する矛盾を定式化する．そしてその定式化に基づいた HSMIS の推論を制御する機構を提案する．

4.6.1 架空オラクル

SMIS においてオラクルは全ての推論の根拠となっており，4.5.2節で示したようにオラクルから学習者モデルを導出する全てのステップを演繹的な因果関係で結び付けることができる．このため，ATMS に対するオラクルの通知の方式，および通知されているオラクルの状態を非単調に変化させることにより，SMIS の推論過程や振舞いを制御することができる．ここでは，優秀な教師が持つより少ない出題により学習者の状態を把握するための洞察力を実現するために，上記のアイディアを適用する．

既に述べたように，教師は学習者が持っているであろう知識についての信頼をもとに，より少ない出題から学習者の理解状態を同定していると考えられる．そしてその信頼に相容れない学習者の振舞いを観察すると信頼を取り消し，改めて学習者の状態を確認しようとする．また，学習者の応答が予測範囲内になければ，教師はより多くの量の質問を行なってできるだけ正確に学習者の状態を理解しようとする．このような学習者が持つ知識への信頼の非単調な制御をモデル推論システムが実現するために，学習者モデルに既に存在するかあるいは付加しようとする節に対する信頼の仮定と，信頼の仮定に反するデータが得られた時に起こる信頼の矛盾が定式化されている．

trust(C): 学習者が節 Cに対応する知識を根拠として応答していると信じられるというシステムの信頼を表現している．この仮定が有効な場合，架空オラクルジェネレータは Cのトップレベルトレースを構築するために必要な架空オラクルを生成する．

学習者がある問題に対して$< A', T >$と言明した場合，仮定 $\mathbf{oracle}(A', T)$ が ATMS に通知される．そして節 $C = (A \leftarrow B_1, B_2, \cdots, B_k)$ を学習者が用いてこのオラクルを導出したであろうという信頼をシステムが持った場合，仮定データ $\mathbf{trust}(C)$ が生成される．

学習者が持っていると考えられる節 $C = (A \leftarrow B_1, B_2, \cdots, B_k)$ を満たす正解知識が，基礎原子式の形で前提データ $\mathrm{text}(B_1', T_1), \cdots, \mathrm{text}(B_k', T_k)$ として ATMS に伝えられて

いる．このとき $i=1\cdots k$ について節 C とオラクル $\mathbf{oracle}(A',T)$ が支持する正解知識 B'_i についてのオラクルが導かれる

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{trust}(C)\\ \mathbf{oracle}(A',T)\\ \mathbf{text}(B'_i,\,T_i)\end{array}\right\} \Rightarrow v_oracle(B'_i,\,T_i)$$

以上のように信頼に基づき導出されたオラクルを，学習者の言明に基づくものと区別して架空オラクルと呼ぶ．ただしこの区別はデータの一貫性管理のためのものであり，ある時点の特性環境において in である **oracle** と *v_oracle* は，共にモデル推論の根拠としては等価に扱われる．架空オラクルを導出しそれをオラクルと同等に扱うことにより，SMIS はオラクル$< A',T >$に対する C のトップレベルトレースを学習者に質問することなく構築することができる．

その後，モデル推論過程において C に対する反駁が得られた場合，次の矛盾検出ルールに基づいて (S6) 信頼の矛盾が導かれる．

if ($\mathbf{trust}(C)$ and Ω-$refutation(C)$)

then $\perp$

信頼の矛盾が検出されると，CRS は 4.5.3節における (S1)(S2)(S3) の矛盾と同様に仮定 $\mathbf{trust}(C)$ を out にすることで矛盾を解消する．この操作により，C に対する信頼から導出された全ての架空オラクルが自動的に消滅する．架空オラクルが消滅すると，SMIS はモデル検証に必要な基礎原子式について学習者に質問してオラクルを獲得する．

4.6.2 メタオラクル

一般にルール知識は複数の基礎原子式をカバーする．すなわち基礎原子式形式の言明のみしか許されなければ，ある述語に対するオラクルが代入要素毎に必要であるが，それら全ての根拠を一つのルール知識は代用することができ，モデルの検証のために従来必要であったオラクルの獲得を大幅に減少させることができる[3]．また，知識形態がモデル推論によって得られる節と同一のため，学習者モデルを直接支持することができる．

例えば図 4.6の対話からシステムは次のような表現の言明を獲得することができる．

[3]ルール知識の言明が理想的に連鎖していたとしても最もプリミティブなレベルのオラクルはモデル検証のために最低限必要である．

```
System :  Does rice grow in Russia?
Student:  Yes, it does.
System :  Why do you think rice grows in Russia?
Student:  It has wide flat field and river.
```

図 4.6: メタオラクルが獲得可能な対話の例

$< grow(rice, russia, T), true >$

```
grow(rice, Place) ::-
        flat_field(Place),
        river(Place).
```

前者は通常のオラクルであるが，後者の言明はルール状である．このようなルール知識の言明をメタオラクルと呼び，次の種類の仮定として定式化されている．

metaOracle(C,T): 学習者が節 Cに対応するルール知識そのものについて Tという真理値で言明したということを表現している．

メタオラクルは以下の推論過程でモデル推論に利用できる．まず，学習者が節 $C = (A \leftarrow B_1, B_2, \cdots, B_k)$ についての言明を行なった場合，SMIS は仮定 **metaOracle**(C, T) を ATMS に通知する．

メタオラクルは学習者のルール知識の言明に基づくため，学習者モデルに付加すべき節 Cを SMIS が探索する必要はなくメタオラクルから直接導ける．

$$\textbf{metaOracle}(C, \text{yes}) \Rightarrow model(C)$$

同様に，ルール知識に対する否定の言明に基づくメタオラクルは学習者モデル中の節を直接否定する．

$$\textbf{metaOracle}(C, \text{no}) \Rightarrow \Omega\text{-}refutation(C)$$

メタオラクルへの反例が得られると，CRS は次のルールで (S7) **メタオラクルの矛盾**を検出する．

if (**metaOracle**(C, yes) **and** Ω-$refutation(C)$)
then $\perp$

メタオラクルの矛盾は，信頼の矛盾と同様に仮定 **metaOracle**(C, yes) を out にすることで解消される．その結果，$model(C)$ は自動的にモデルから取り除かれる．

4.7節では，本節で示した枠組を実際に学習者モデル構築に利用する際の運用法とそのための知識について詳述することとする．

4.6.3 HSMISの動作

ここではHSMISの動作の概略を述べる.

(1) 架空オラクルジェネレータは必要ならばオラクルから架空オラクルを導出し, ATMSに通知する.

(2) SMISは矛盾の発生を含む全推論過程をATMSに通知し, ATMSはそれをデータベースに記録する.

(3) 矛盾が発生すると, SMISはその解消をCRSに依頼する.

(4) CRSはデフォルト矛盾については既に述べたような方法で矛盾解消する. オラクル環境矛盾の場合, 各オラクルの元となる仮定の状態を操作して新たなオラクル集合を生成し, その無矛盾性をATMSに照会する.

(5) ATMSは照会されたオラクル集合を矛盾原因レコードと照合し, その結果と通知すると共に,

(6) 新しいオラクル集合が無矛盾であれば, SMISの推論データの一貫性を修復し, 制御をSMISに戻す.

4.7 学習者モデルモジュールの運用に関する考察

4.7.1 動作例

本章で示してきた定式化により, 非単調な推論制御能力を持つ学習者モデル推論の基本的な枠組を構築することができた. この枠組を利用して実現可能な学習者モデル構築におけるシステムと学習者の対話例を図4.7に示す. そして本章で提案する枠組の理解を容易にするために, 多少厳密さには欠けるがシステムの逐次的な動作とその際の意図をまず解説する. ここで, 正解のProlog節C_pは

```
grow(Plant, Place) : −
        suitable_temperature(Plant, Place),
        suitable_soil(Plant, Place),
        suitable_lay(Plant, Place),
        has_irrigation(Place).
```

であるとする. この節は, ある地域である植物が生育するためには温度・土壌・地形がその植物に適し, しかも灌漑の存在が必要という知識を表現している. (a)の対話において, 学習者が代入要素 "新潟" における米の生育について正解したため, システムはC_pに対応する節Cへの信頼に基づき新潟の温度・土壌・地形・灌漑について架空オラクルを生

```
(a) Does rice grow in Niigata ?
>> Yes.[Yes]

(b) Does rice grow in Kiev ?
>> Yes.[No]

(c) Does rice grow in Mongolia ?
>> Yes.[No]
(d) Is the temperature of Mongolia suitable for rice ?
>> Yes.[Yes]
(e) Is the soil of Mongolia suitable for rice ?
>> Yes.[Yes]
(f) Is the lay of Mongolia suitable for rice ?
>> Yes.[Yes]
(g) Does Mongolia have an irrigation ?
>> No.[No]

(h) Is the temperature of Kiev suitable for rice ?
                    ...
                    ...
```

図 4.7: HSMIS の動作例
(下線部が学習者の応答, [] 内は正解)

成することで，これらについての質問を行なうことなくCをモデルに付加できる．代入要素“キエフ”についての対話 (b) では，正解から温度条件のみが欠落した典型的な誤った理解を示す節 C'

```
grow(Plant, Place) : −
        suitable_soil(Plant, Place),
        suitable_lay(Plant, Place),
        has_irrigation(Place).
```

で学習者の誤答を説明できるため，システムは仮定 **trust**(C) を out にすると共に仮定 **trust**(C') からキエフについての架空オラクルを導出してモデルを構築する．既に導かれていた代入要素“新潟”についての架空オラクルのうちC'を支持するものは，仮定 **trust**(C') から再導出することで存続してモデルを支持する．

次にシステムは代入要素“モンゴル”を用いてモデル構築を行なおうとするが，誤答 (c) から学習者が正解からかけ離れた理解を持つ可能性が高く節C'に対する信頼を設定できないため，**trust**(C') を out にする．このためモンゴルについての架空オラクルを生成できず，システムは (d)～(g) のようにオラクル要求の質問を行なう．また，仮定 **trust**(C') が out になると同時に，この仮定から導かれていた新潟とキエフについての架空オラクルが消滅し，これらの代入要素についてオラクルを獲得する必要が生ずる．このときシステムは，4.3.3節で示した話題による出題制御メカニズムを利用して新潟についてのオラクルを消去することにより，(h) 以降のようにオラクル獲得のための質問をより最近の話題であるキエフに限定している．以下，本節ではこれまでに示してきた枠組が実際に上のような動作を得るために，教師の非単調性認識·制御メカニズムを更に考察し，HSMIS を適切に運用するための知識およびメカニズムを提案する．

4.7.2 教育的な判断に基づく非単調なモデル推論の制御

教師の出題戦略に基づく制御

本研究では，教師の出題戦略が“学習者の理解状態の把握に自信がある時には詳しく質問をしない”，“あまり自信がない時には詳しく聞く”という原理に従っているという考えに基づき，出題戦略の実現のために仮定 **trust** を設定している．

いま，4.7.3節で述べる方法により学習者モデル中の，またはモデルに付加しようとしている節の信頼度が定義できるとする．ここで，信頼度があらかじめ与えられた定数Kを越えている節 $C = (A \leftarrow B_1, B_2, \cdots, B_k)$ のヘッド部の述語 A についてオラクル $< A', T >$が得られたとし，$B'_1, B'_2, \cdots, B'_k$についての教材知識とオラクル$< A', T >$がC

を論理的に支持する時，4.6.1節で示したように$B'_1, B'_2, \cdots, B'_k$についての架空オラクルが仮定 **trust**(C) から導かれることになる．オラクルの成立条件についての架空オラクルの生成により HSMIS は，学習者モデル中の節の信頼度が高いレベルにある限り下位知識の出題 (質問) を行なわない．今まで信頼していた節Cが否定されて信頼の矛盾が検出された場合，仮定 **trust**(C) が棄却されるとともにCから導かれていた架空オラクルも全て消滅する．架空オラクルの消滅に伴い，学習者への出題が行なわれ必要なオラクルが獲得される．HSMIS が別の節$\tilde{C}$を信頼する場合には，仮定 **trust**($\tilde{C}$) を支持する架空オラクルが新たな支持理由により生成されるかもしくは復活する．

話題の変化に応じた制御

教師は学習者の理解状態を推測する際に学習者の過去の言動について疑問を抱いたとしても，現在の対話の流れに沿わない話題を持ち出して出題を行なうことはあまりない．既に示したように架空オラクルが消滅したりモデル構築スコープが拡大するような場合，HSMIS はモデルの正当性の検証のためにオラクルを必要とする．しかし，現在の話題に外れたデータを論理的に必要であるというだけの理由からシステムが獲得しようとすることは教育的に適切であるとは考えられない．むしろ忘れてもいいような過去の話題に関しては積極的にモデル構築の対象データから除外することが望ましい．

スケジューラはある時点の教育単元 (トピックスペース) をひとつの基礎原子式として表現するが，この変数に代入される実体を現在の教育コンテクストにおける代入要素として扱うこととする．HSMIS では代入要素を制御の単位として次のようにオラクルを操作することでモデル構築の際の話題を制御する．

4.7.2節と同様，学習者モデル中にある節の信頼度が定義できるとし，現在の単元においてモデル構築対象となった代入要素の時系列$S_{\mathcal{I}} = \{\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \cdots, \mathcal{I}_n\}$とモデル推論時の検証代入要素数を規定する定数$R$が与えられているとする．ここで，$k < n - R$なる代入要素$\mathcal{I}_k$について，$\mathcal{I}_k$に属するオラクルが信頼度の高い節の反例となっているか，もしくは SMDS が$\mathcal{I}_k$についてのオラクルを要求した場合，SMIS は代入要素$\mathcal{I}_k$を持つオラクルを削除し，モデル構築·検証の対象から除外する．

4.7.3 学習者モデルの信頼性と非単調性の制御

4.7.2節で示した制御メカニズムは学習者モデルの信頼度が定義できることを前提としている．また，学習者の理解が非単調であることに起因するモデル推論の非単調な制御

は，理解状態が変化したことへの認識に基づいて行なわれる必要がある．そのためにここでは学習者モデルの信頼度の概念を導入し，教師の振舞いについての考察をもとにしてその設定メカニズムを構成する．またこの学習者モデルの信頼性設定メカニズムを適用することにより，3.4節で述べた矛盾の判別ヒューリスティックを用いて学習者モデル推論における矛盾の種類を判別することが可能となる．

本研究では教師の行なっている理解状態同定過程が次のような性質を持つものであると考えている．

- 教師は学習者の理解状態についてドメイン依存の有力仮説集合を自身の経験に応じて持ち，できるだけその集合の中で理解状態を同定しようとする．
- 集合に含まれる仮説は教師が全仮説を瞬時に検証できる数に限られ，それ故に大きな集合を扱える教師は洞察力が高い．
- 有力仮説集合中に学習者の理解状態を表せる仮説がなかった場合，教師は全数探索により理解状態を表現できるモデルを生成する．

教師は自分が持つ学習者の理解状態の推測の自信に関する次のようなルールを持つと考えられる．

- 一般に，採用されている仮説を支持する学習者の言明が増加した場合，および有力仮説集合中の他の仮説を否定する言明が増加した場合，採用されている仮説の信頼度は上昇する．
- 集合中の有力仮説の信頼度の初期値は高く，全数探索で生成された仮説の信頼度の初期値は低い．
- 有力仮説の信頼度の初期値は優先度により順序付けられており，複数の仮説が採用できる時は最も信頼度，もしくは順位の高い仮説を採用する．

このメカニズムをHSMISに対応付けると，有力仮説集合は4.3.1節の探索制御知識に当たり，有力仮説が全て否定された後の全数探索は精密化グラフの全探索に対応する．以上の考察に基づき次のようにモデルの信頼度を設定することとする．

4.3.1節で示したバグ知識集合$\mathcal{S}$中の各節$C_k(1 \leq k \leq n)$について信頼度の初期値$\mathcal{CF}_k$が設定されている．ただし，任意の$i,j(1 \leq i < j \leq n)$について$\mathcal{CF}_i \geq \mathcal{CF}_j$である．また，$\mathcal{S}$に含まれない$\mathcal{G}$中の全ての節について，$\mathcal{G}$の根$R_{\mathcal{G}}$からの距離に比例した信頼度の初期値が設定されている．ただし，$\mathcal{S}$に含まれない節の信頼度の初期値は，$\mathcal{S}$に含まれる

どの節の信頼度の初期値も越えないものとする．以上の考察に基づき，次のように学習者モデルの構築を制御する．

1. 新たな代入要素についてのオラクルが得られた場合，$\mathcal{S}$中の全ての節 C_kについて新たなオラクルによる検証を行ない，オラクルが C_kを支持すれば $\mathcal{CF}_k$に定数 Xを加えオラクルが C_kの反例となれば $\mathcal{CF}_k$から定数 Yを減じる．
2. 学習者モデル $\mathcal{M}$ を空集合とし，$\mathcal{S}$において信頼度が正数である全ての節を信頼度の降順に並べ替えた集合を $\mathcal{S}'$とする．
3. 現在モデル構築対象となっている代入要素の集合 $S_{\mathcal{I}}$の複製を作成し $\mathcal{I}$とする．
4. $\mathcal{S}'$から順に節 C_iを取り出し，$\mathcal{I}$中の代入要素 I_kに属するオラクルが C_iを支持すれば，C_iを $\mathcal{M}$ に付加し C_iを支持する代入要素を全て $\mathcal{I}$から除去する．
5. $\mathcal{I}$が空であれば終了する．
6. $\mathcal{I}$中のオラクルについて精密化グラフ $\mathcal{G}$を探索し，オラクルを支持しかつ他のオラクルによる否定のない節を $\mathcal{M}$ に付加する．このとき支持する代入要素につき Xをその節の信頼度の初期値に加える．

4.7.4 学習者の理解と振舞いに適応した非単調なモデル推論の制御

教育の場面で学習者の理解状態が変化するのは，多くの場合教師が意図して修正教育の行動をとった時と考えられる．このような場合，教師は学習者の理解が変化することへの期待をもって修正教育を施し，学習者の反応から理解状態が期待通りに変化したかどうかを認識すると考えられる．これを次のように実現する．

学習者モデルが高い信頼度で構築できているとする．スケジューラは知識の修正方向を示す情報を基に修正戦略を起動するが，この情報はシステムが期待している理解状態の変化方向にあたる．起動された戦略による教育行動が終了した後に学習者に出題を行なえば，学習者の理解状態が実際に変化したかを判定できる．そして学習者の理解状態の変化を予測して実際に変化すれば理解状態の変化したオラクルを同定し，対応する仮定 orale の状態を制御して学習者の変化に追随する．

4.8 結言

本章では，単一世界矛盾を扱う学習者モデル構築アルゴリズム HSMIS について述べた．HSMIS は帰納推論に基づく仮説型学習者モデル推論システムであり，そのアルゴリ

ズムは簡潔でかつ強力である．本研究では，帰納推論システム SMIS が持つ汎用性，論理性などの特性を維持しなおかつ柔軟性を満足した学習者モデル推論システムの構築を目指し，単一世界矛盾の定式化に基づいて HSMIS の推論メカニズムを構築した．以上のように高度な技術が組み込まれているにもかかわらず，HSMIS は 20MIPS 程度の UNIX ワークステーションにおいて実時間で動作し，質問の数も ITS の運用上問題のない程度にまで減少させることに成功している．本章で示した枠組は，Common-ESP[AIR91] 言語環境上で実現されている．

本章で提案している ATMS を利用した学習者モデル推論方式はまだ大きな潜在能力を秘めていると考えられ，その能力の追求は極めて興味深い問題である．次章では，多重世界矛盾をも扱うことのできる学習者モデル推論の枠組を HSMIS で提案した手法をベースに構築することにする．

第 5 章

多重世界における非単調モデル推論

5.1 緒言

学習者は知識を獲得し定着させる段階において，しばしば一貫性のない振舞いを見せる．これは学習者が知識を定着できていない，あるいは関連する概念を定式化しきれていないなどのために，問題解決知識を不安定に適用してしまうということがよくあるということを示している．このような学習者の知識の矛盾，すなわち多重世界矛盾は，第4章で論じたモデルを更新して解消すべき種類のもの，すなわち単一世界矛盾とは異なり，学習者自身が矛盾していると捉えてモデル化すべき教育的により重要な種類の矛盾である．学習者の知識の矛盾をモデル化することにより，知識の学習·定着過程にある学習者をサポートして，最終的に正しい知識を学習者に獲得させ定着させることが可能となる．

精密かつ正確な学習者モデルの構築は困難な問題であり，それが故により精密なモデルの構築を目指すことを避けるべきであるという議論がある [Self88]．しかし教育的観点から見れば，より高度な教育戦略を用いて柔軟でかつ効果の高い教育を ITS において実現するために，その教育戦略を運用するために必要な精密さを持った学習者モデルを構築すべきであることは自明である．学習者が持つ知識の矛盾を指摘して自己修正を促すことにより学習者の知識定着を支援する教育戦略として著名なソクラテス法は，既にその有効性が認められている．このソクラテス法に基づく教授行動を生成するためには，モデル推論システムが学習者の知識獲得·定着過程を捉え，学習者が持つ知識を，それがたとえ矛盾したものであったとしても，学習者が持っているとおりにモデル化する必要がある．

既に提案されている ITS のアーキテクチャの中には，WHY[Stevens77] をはじめとし

関連論文 [A2,B1,B2]

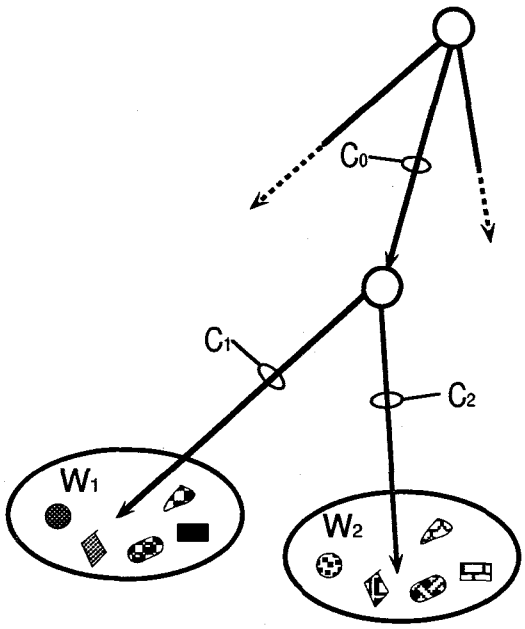


図 5.1: 概念弁別木の例

てソクラテス式教育法を実現していると主張しているものがいくつか見受けられる．しかし，それらの多くは学習者がその内部に持つ矛盾を認識してそれを指摘·示唆するわけではなく，単に学習者の知識に対する反例を新たに与えることによって矛盾を作り出しているだけである．その意味で，これらのシステムが実現しているのは“真の”そして“完全な”ソクラテス式教授ではない．

本研究では学習者の知識の矛盾を，第4章で述べたHSMISにおいて扱う単一世界矛盾と同様に，概念弁別木を操作して扱う“多重世界矛盾”として仮説推論の枠組の上で定式化することにより，この二つの矛盾を統合的に処理することができる学習者モデル構築アルゴリズムTHEMISを開発した．本章では，概念弁別モデルに基づいて学習者の知識の矛盾を定式化した上で，概念弁別木に基づくモデル表現およびその構築アーキテクチャを提案する．そして，THEMISにより構築されたモデルにより真の意味でのソクラテス式教授を実現できることを示す．

5.2 多重世界論理に基づく学習者の知識の矛盾の定式化

ここでは学習者の知識の矛盾を捉えるために，多重世界に基づく知識利用のモデルを提案する．

人間の問題解決を，

- 問題がどの世界 (概念) に属するかを弁別構造に従って探索し,
- 発見された世界の中で問題解決に寄与する知識を検索し適用する,

というモデルで捉える. 対象問題が属する概念の決定は, 図 5.1のような概念弁別木と呼ばれる概念をノードとする探索木を根から探索することに対応付ける. 与えられた問題はあらかじめ決められた概念プリミティブの列に分節化され, その属性値の列を弁別木に対応付けることにより問題が属する世界を決定する. 弁別木の枝をつたって概念ノードを移動する際には, 図 5.1に $C_0 \cdot C_1 \cdot C_2$と示されているような対象とする概念を特徴付ける属性値の条件を問題が満たしていることが求められる. 例えば, "直線運動" という概念を表すノードの下位には, "等速度運動" と "等加速度直線運動" の概念がある. そして, ノード "直線運動" に属する問題で "速度が一定である" や "加速度が 0 である" などの条件を満たすものは, "等速度運動" の概念ノードに属している. このような弁別木の探索により問題が属する世界が決定されると, その世界の中で問題解決知識が検索され実行される.

学習者の概念弁別·知識探索構造を以上のように多重世界推論メカニズムとして計算機モデル化することにより, 学習者の知識の矛盾を定式化することができる. 例えば, 等速度運動と等加速度直線運動を弁別できていない学習者は, これらの木を探索する際の弁別条件を構築できていないと捉えられる. 図 5.2の C_1, C_2の弁別条件が欠落している学習者は二つの世界 W_1と W_2を混同し, 与えられた問題が本来属さないはずの概念において定義されている知識を不安定に適用しがちになることになる. 同様に図 3.1の問 3 の例では, 学習者は普通は定式化された世界で解かれるべき問題について, 素朴概念の世界の弁別条件を欠落しているために素朴概念の知識を検索し適用したと捉えられる.

以上のように, 弁別木上の弁別条件の異常のために同種の複数の問題について問題解決を行なう世界が異なった場合, その結果として適用される知識に一貫性がなくなる状態として学習者の知識の矛盾は捉えられる. 学習者の知識の矛盾は, 弁別木上の弁別条件の欠落という形式, すなわちオーバレイモデルとしてモデル表現する.

次に各世界内で検索·適用される問題解決知識を定式化することにする. 問題解決は一般に $\mathtt{predicate}(G, \tilde{X}_{\mathrm{in}}, \tilde{X}_{\mathrm{out}})$ という形態の Prolog の述語として呼び出されることとする. Gは問題のゴール, すなわちいかなる制約から何を求めるか, ということを表現する. $\tilde{X}_{\mathrm{in}}$は呼びだし時に既に値が代入されている入力変数のベクトル, $\tilde{X}_{\mathrm{out}}$は呼びだし時には値が決まっていない出力変数のベクトルであり, $\{\tilde{X}_{\mathrm{in}}, \tilde{X}_{\mathrm{out}}\}$で全問題空間の分節を表現しているとする. 例えば,「運動」の問題空間の各要素は順に, 運動中の物体の質量, 変位,

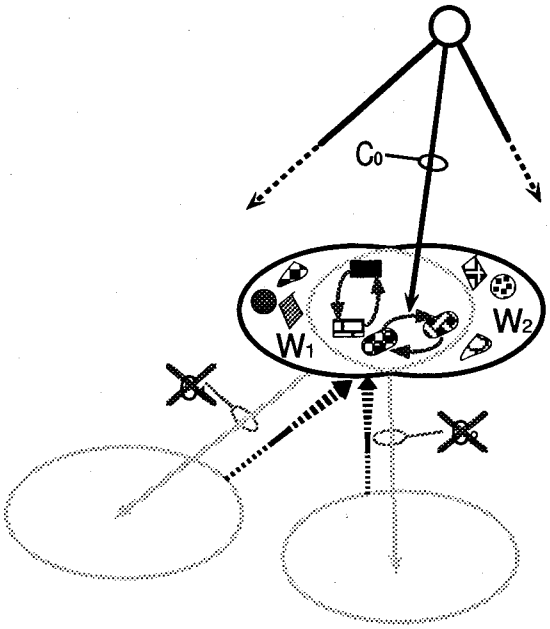


図 5.2: 学習者の概念の未分化を表現した弁別木の例

速度，加速度，加わる力の時間関数，そしていくつかの時刻における各要素の値，で表現される．時間関数で表す要素は，関数そのものとその属性のペアの形で表現されている．例えば図 3.1の問 1 の問題は $\{m,(s(t)),(v(t)),(a(t),fixed),(f(t)),[(2,S_0,(0,0),a_0,F_0),(0,(0,0),(19.6,0),a_1,F_1)]\}$ と分節表現することができる．このとき，$t=0$ の時の変位，速度は問題文中に与えられているため，それらを表す要素の値は入力変数として問題解決開始時に与えられている．問題解決とは与えられた入力パラメータ列 $\{\tilde{X}_{\rm in}\}$ に問題解決知識に表現されている操作を行ない，出力パラメータ列 $\{\tilde{X}_{\rm out}\}$ を導き出すこととして定義することができる．

問題解決知識の本体は，適用領域を定義して知識の適用可能性を評価するための評価部と実際の問題解決オペレータの逐次的な適用を記述した手続き本体部からなり，

$\texttt{solve}(G,\tilde{X}_{\rm in},\tilde{X}_{\rm out})$:-

$\texttt{predicates_for_applicability}(\tilde{X}_{\rm in})$,

$\texttt{procedural_bodies}(G,\tilde{X}_{\rm in},\tilde{X}_{\rm out})$.

という形で表現することにする．評価部の述語を “世界述語” と呼び，先に述べた概念弁別木上の弁別条件に対応する．手続き本体部の述語の誤り·付加·欠落は伝統的なバグに対応する．概念の未分化は世界述語条件の欠落として表現され，その条件が欠落した知識は本来ならば適用されないはずの別の概念領域においても適用可能となる．その結果，その概念領域では本来の問題解決知識と適用条件の誤った知識の両方が適用可能になる．

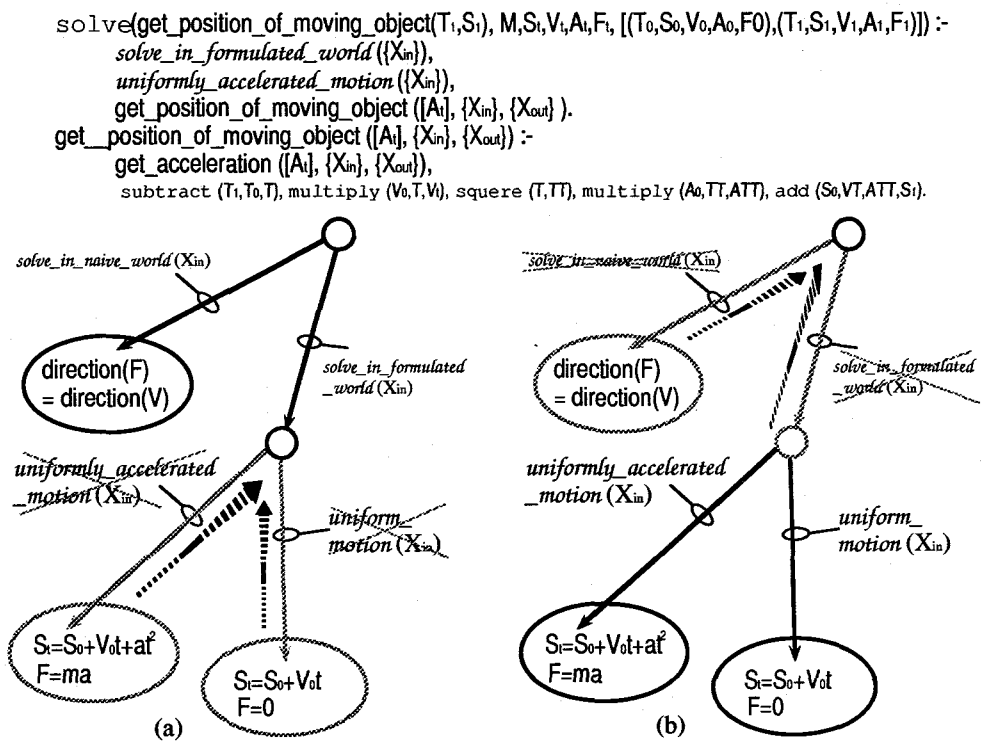


図 5.3: 弁別木による学習者の知識の矛盾のモデル化の例

そして場合によってどちらの知識が適用されるかが変化するために外部からは不安定な問題解決手続きの適用，すなわち学習者の知識の矛盾として観測される．

図 3.1の例における P の位置を求めるための問題解決知識を図 5.3のように記述する．第 1 の節の条件 "*solve_in_formulated_world*" と "*uniformly_accelerated_motion*" はともに世界述語であり，ボディの最後の述語は手続き部に属する．例えば，等加速度直線運動の概念が完全に形成されていない学習者の場合，図 5.3(a) に示すように後者の世界述語条件がなく，等速度運動の問題でもこの問題解決知識の適用が可能になってしまっているという形で表現される．

また，図 3.1の問 1 と問 3 に対する回答のように学習者が素朴概念に属する誤概念を用いてしまうような場合，図 5.3(b) に示すように世界述語 "*solve_in_formulated_world*" と "*solve_in_naive_world*" の欠落として表現される．このとき本来問題解決に用いられないはずの素朴概念世界に属する知識が適用可能となることで，学習者の知識の矛盾が表現されている．

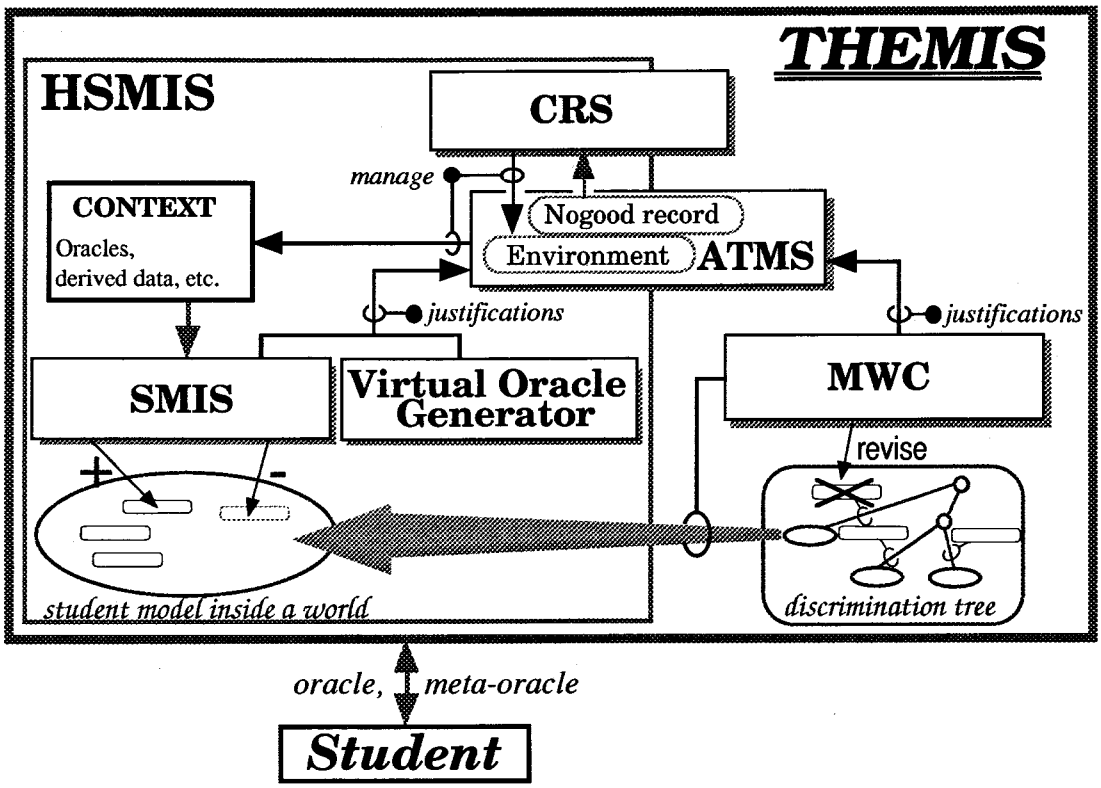


図 5.4: THEMIS の構成

5.3 THEMIS:多重世界における学習者モデル推論

前節において学習者の知識の矛盾，すなわち多重世界矛盾を概念弁別木における世界述語の欠落という形で計算機モデル化することができた．ここではその記号化に基づき，単一世界矛盾と共に多重世界矛盾をも扱うことのできる学習者モデル推論システム THEMIS を定式化することにする．

図 5.4に示すように THEMIS は HSMIS と MWC(Multi-World Controller) から成っている．HSMIS は単一世界のモデル構築を受け持ち，MWC はシステム全体の推論過程を多重世界のもとで制御する．概念弁別木はドメイン知識の一部として事前に与えられる．この枠組により THEMIS は，各世界での学習者の応答と学習者モデルの無矛盾性を維持しながら，概念弁別木に基づく多重世界の枠組の上で学習者の知識の矛盾を表現することができる．

THEMIS において多重世界の制御の役割を持つ MWC は，世界を弁別するための弁別条件の状態，および各世界に含まれる学習者の応答 (オラクル) の集合を管理する．各世界においてオラクルからモデルを構築する機能は HSMIS によって提供される．MWC は 3.4節で示した矛盾判別ヒューリスティックスに従い，次の手順でモデル構築を制御する．

- 新たに獲得された学習者の応答が対応する世界のモデル中の信頼度の高い知識で説明できない場合，その応答による矛盾を多重世界矛盾として扱おうとする．
  - その応答が他の世界に既に存在する知識で満足されるかどうかをテストする（その応答が属すべき世界 W からの距離の昇順に世界を順次検査する）．
  - 学習者の応答を満足する世界 W' が見つかると，学習者の応答をその世界に移し，W と W' を弁別する条件が学習者によって意識されていないとする．
- それ以外の場合，システムは単一世界矛盾と解釈して HSMIS により正しい世界に属するモデルを更新する．

5.3.1 THEMIS の推論過程の定式化

THEMIS では HSMIS と同様に多重世界矛盾を定式化する枠組として ATMS を採用している．THEMIS の推論過程は本節で示すように定式化することができる．

THEMIS では多重世界矛盾を捉えるために以下の二種類の仮定を用意している．

belong(P,W_1) 学習者が問題 Pは世界 W_1に所属すると認識していることを表現する所属性仮定

discriminate(W_1,W_2) 学習者が世界 W_1と W_2を正しく弁別できていることを表現する弁別仮定

問題空間の入力変数に対するある代入の集合を 1 つの問題と呼ぶことにする．ある問題$\tilde{P}$が世界 W_1に所属すると学習者が考えているという (システムの) 仮定 “belong” は仮定データ $\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)$ として ATMS に通知される．

学習者モデルに付加する節は各世界毎に別のモデルと扱われるように拡張される．また，そのために節をモデルに付加する際の支持理由に仮定 belong が加えられる．

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{oracle}(A', T') \\ \Omega\text{-}\mathbf{consistent}(C) \\ \mathbf{general}(C) \\ \mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1) \\ \mathit{cover}(C, A')\end{array}\right\} \Rightarrow \mathit{model}(C, W_1)$$

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{metaOracle}(C, \mathit{yes}) \\ \Omega\text{-}\mathbf{consistent}(C) \\ \mathbf{general}(C) \\ \mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)\end{array}\right\} \Rightarrow \mathit{model}(C, W_1)$$

二つの世界 W_1 と W_2 を学習者は弁別できるものとしてあらかじめ仮定されており，仮定データ $\mathbf{discriminate}(W_1, W_2)$ が通知されている．

本来 W_1 に所属するはずの問題 $\tilde{P}$ に W_2 に所属する節が適用された場合，仮定 $\mathrm{belong}(\tilde{P}, W_2)$ が生成され，次のような支持理由で W_1 と W_2 が弁別できてないことを示すデータが導出される．

$$\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_2) \Rightarrow \mathit{indiscriminate}(W_1, W_2)$$

システムが世界 W_1 に属する問題 $\tilde{P}$ を出題する際に，その世界を学習者が弁別できていると仮定されている場合，次のような支持理由から学習者が $\tilde{P}$ を W_1 のなかで解くことが期待される．

$$\left.\begin{array}{l}\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1) \\ \mathbf{discriminate}(W_1, W_2)\end{array}\right\} \Rightarrow \mathit{solveIn}(\tilde{P}, W_1)$$

$\mathit{solveIn}(\tilde{P}, W_1)$ が導出されており，世界 W_1 のモデル中の信頼度の高い節 C が $\tilde{P}$ に単一化可能である場合，システムは学習者の回答，すなわちオラクルを予測する．

$$\left.\begin{array}{l}\mathit{solveIn}(\tilde{P}, W_1) \\ \mathit{model}(C, W_1)\end{array}\right\} \Rightarrow \mathit{modelPrediction}(\tilde{P}')$$

5.3.2 矛盾の検出と解消

$\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)$ と $\mathbf{discriminate}(W_1, W_2)$ の両方の仮定が成立する状況であれば，学習者は W_1 に属する問題解決知識 $\mathcal{M}_1$ を $\tilde{P}$ に適用できると考える．しかし，学習者が W_1 と W_2 を弁別し切れていなければ，W_1 で解くべき問題 $\tilde{P}$ に対して W_2 に属する問題解決知識 $\mathcal{M}_2$ を適用してしまう場合が現れる．このような場合，所属性仮定 $\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)$ と $\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_2)$ から，および $\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_2)$ から導かれた $\mathit{indiscriminate}(W_1, W_2)$ と $\mathbf{discriminate}(W_1, W_2)$ から矛盾が導出され，ATMS に通知される．この矛盾を解消する過程においてオラクルの所属する世界の移動と弁別木上の弁別条件の更新が行なわれ，学習者の概念未分化に起因する学習者の知識の矛盾がモデル表現できることになる．ATMS に通知された矛盾の解消は基本的にあらかじめ想定されていた仮定を out にすることでなされる．上の例では，学習者が問題の所属性を正しく認識していると想定していた仮定，すなわち $\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)$ が out になる．

以上から，多重世界矛盾において定義される矛盾は以下の三種類に分類される．

(M1) 所属性の矛盾

$$\mathbf{if}\ (\mathbf{belong}(\tilde{P}, W_1)\ \mathbf{and}\ \mathbf{belong}(\tilde{P}, W_2)\ \mathbf{and}\ W_1 \neq W_2)\ \mathbf{then}\ \bot$$

(M2) 弁別関係の矛盾

if (**discriminate**(W_1, W_2) **and** $indiscriminate(W_1, W_2)$) **then** $\perp$

(M3) モデルによる予測と学習者の応答の矛盾

if (**oracle**$(\tilde{P}_0)$ **and** $modelPrediction(\tilde{P}')$) **then** $\perp$

既に述べたようにこれらの矛盾はモデリング仮説の矛盾に似た方法，あらかじめ想定されて学習者の回答予測の基となった仮定を out にすることで解消される．すなわち，(M1) の矛盾ではあらかじめ期待されていた仮定 belongを，(M2) では仮定 discriminate を，そして (M3) では回答予測 modelPrediction を導いた仮定 belongをそれぞれ棄却する．

5.3.3 学習者の知識の矛盾のモデル構築

ここでは，図 3.1の例を用いて THEMIS が行なうモデル構築の過程を説明する．

この例では，過去に学習者は問 1 を含む複数の問題に正解しているため等加速度直線運動している物体に加わる力を得るための正しい知識を表す節がモデル中の等加速度直線運動の世界にある．しかし，その後学習者は素朴物理世界を用いて問 3 の回答を出してしまう．このとき，HSMIS は学習者の回答から生成されたオラクル

```
oracle(subtract(19.6,0,19.6),true)
oracle(subtract(2,0,2),true)
    ...
```

を受けとる．モデル中にある上の節はこれらのオラクルを満足せず，学習者のものとは異なる回答を導出してしまう．このため，HSMIS はこのオラクルをカバーすることができる get_direction_of_force(···) をヘッドとする節を必要とする．学習者は過去にこの知識を用いて複数の問題に正解を導出しているためこの節は十分に信頼度が高いにもかかわらず，この節を適用できるはずのこの問題において学習者はこの節を用いていない．故に等加速度直線運動の世界で学習者が問題を解こうとしたと捉えるのは困難である．

以上の理由から，THEMIS はこの世界の中でオラクルを満足する節を生成・付加して矛盾を解消する方法を選ばず，むしろ多重世界矛盾と捉え対処しようとする．そのために THEMIS はこの問題に対する学習者の回答を満足する節を既に持つ世界を探しにゆく．該当する世界が見つからなければ，学習者の素朴概念的な問題解決を扱う“素朴概念の世界”を最後に探索する．この例では，その世界に既に用意されていた「運動は力を含意する」誤概念に基づく節で上記オラクルが満足される．そのため，MWC は図 5.3(b) に示すように，素朴概念の世界と定式化された運動の世界を分ける弁別条件が評価され

Tutor:	Solve this problem. (問1の類題をもう一度与えて解かせる) 学習者は与えた問題に正解する
Tutor:	You answered in Question 3 that the direction of the force which the sphere receives is upward at t=1s, because it is still moving upwards then. If that was correct, why didn't you say that the sphere in Question 1 receives force to the right?
Student:	Because it was moving upwards, so it is hardly possible that it continued receiving force downward.
Tutor:	The two problems are completely the same, e.g., speed at each time, etc., except for the direction of motion. If direction of force were to be implied from motion, you should have naturally said that the direction of the force is to the left in Question 1, but you didn't. (You should have ''motion implies force'' misconception in your naive physical world. ···)

図 5.5: 学習者の知識の矛盾をモデル化することにより可能となる教育的対話の例

ないとマークし，5.3.2節で示した方法で推論過程の矛盾は解消される．これにより，定式化された物理公式と素朴概念中の誤概念を不安定に適用する学習者の状態を，多重世界における学習者の知識の矛盾としてモデル表現している．

5.3.4 知識の矛盾の認識に基づく教育

これまでに述べてきたような方法を用いて学習者の知識の矛盾をモデル化することで，次のような効果的な“真の”ソクラテス式教授を実現することができる．

1. 学習者の概念の混同を検出すると，学習者が混同した概念を過去に正しく適用できた問題の類題を与えて正解させる．

2. 概念の混同に基づく誤答を新たに得られた正答と関連付けて指摘し，二つの回答間の矛盾を認識させる．

3. 矛盾の原因となった概念の混同を指摘するか，または矛盾をベースにして概念分化を間接的にガイドする．

このような教授方法をとることにより，学習者は概念分化に必要な属性，すなわち世界述語を認識して混同していた概念間の関係を形成し，それらの概念とそれに属する知識を正しく獲得することができるようになる．

図3.1の例における学習者の知識の矛盾から素朴概念世界の世界述語“*solve_in_naive_world*”の欠落として表現された学習者モデルを得ることにより，図5.5に示すようなソクラテス式教授が可能となる．この例の場合，問1と問3は運動の方向が異なるだけでその他の属性が全く同一の運動であることを示した上で，矛盾の原因が素朴概念にあったことを明確に指摘して定式化された世界で問題を解くように学習者をガイドしている．

5.4 考察

5.4.1 弁別木モデルの解釈

これまでに概念弁別木を導入した学習者モデルの構築とその利用法について述べてきたが，ここではそのモデルの解釈について考察する．

従来一つの空間における論理プログラムとして表現されてきた学習者モデルに“世界”を導入することにより，従来の選言関係に対応する世界内の節の選言に加えて，世界にまたがる節の選言関係というものが，節と節の間の関係に発生する．このうち，世界内の節の選言関係はある一つの探索空間内での知識の選択に関連する．対して，世界にまたがる選言関係は問題が所属する概念の選択に関連する．このためこれらの二つは自ずと異なる意味を持った関係として定義されるべきである．THEMIS では弁別モデルと世界内のモデルの解釈方法を定義することで，これらの二つの関係に対して異なった性格付けを施している．

問題解決における世界の選択はその問題が所属する概念の選択，すなわち知識の探索空間を設定することにあたる．探索空間が設定されれば，その世界の中で知識が探索され実行される．そしてある述語の呼び出しに際してある世界が選択されれば，その世界内でその呼び出しに単一化可能な節は全て適用可能な選択候補となり得るが，他の世界内に単一化可能な節があったとしてもその節は選択肢にならないこととする．例えば，“物体の変位を求める”という知識の呼び出しの際に“等速度運動”の世界が選択された場合，その世界内の節は選言関係にあるがその他の世界，例えば“等加速度直線運動”の世界に属する節は選択肢とならない．

以上のような性質は弁別木モデル上で世界述語の弁別条件が削除され，概念の未分化が表現された状態においても継承される．すなわち弁別木モデルにおいてある二つの世界が未分化となっていても，ある世界に属する節は別の世界に属する節とお互いに選言関係とはならない．例えば学習者が等速度運動と等加速度直線運動の世界を弁別できていないとモデル表現されている場合においても，ある問題のモデルシミュレーションを行なう際に等速度運動の世界が選択されれば，THEMIS は等加速度直線運動の世界のモデルに属する節を適用しない．

また THEMIS のモデル推論においてモデルを更新する場面にも，次のような一定の制限を課する事にする．THEMIS が学習者の状態を世界間の未分化と捉えるのは，ある問題について他の世界，すなわちその問題が本来属さない世界に既に正解のモデルが構

築されており，かつその世界のモデルがその問題に対する学習者の回答を満足する場合に限る．このことはある問題についてのオラクルが，その問題が本来属する世界内の知識モデル (SMDL モデル) の更新，もしくは弁別木モデルの更新のどちらか一方にしか一度に貢献しないことを意味している．

このような定義は，関連する概念を全く認識･分化できていない場合の学習者の状態をモデル化できないなど，モデル構築可能な範囲に制限をもたらすが，逆にこの制限は推論アルゴリズムに規範を与えてくれる．本研究の枠組で想定する学習者の状態は，関連する概念の存在自体は認識しているがそれらを弁別する基準となる属性を獲得し切れていないという範囲にとどめることにする．

確かに教育の場面では，学習者自身の能力の低さや学習者に与える教材のレベル設定の失敗などにより，学習者がほとんど一貫して振舞えない場合が考えられる．しかし学習者がこのような状態にあるときに，学習者の知識状態を忠実にモデル化しようとすることには，その負荷に見合うだけの意味はない．このような状態は学習者の応答の履歴から比較的単純な処方で検出することができ，検出された場合には教材の基礎に戻って教育をやり直すほうが望ましい．そのような場合には学習者モデルをあえて作る必要はなく，むしろシステム全体を統括しているモジュールに学習者の状態を通知するだけの情報を提供できればそれでよい．

5.4.2 ドメインの性質に基づく THEMIS の探索戦略

人間の知識を宣言的なものと手続き的なものに分離したことが知識工学の初期の段階における成果の一つであるが [上野89]，我々は “知識の性質” そのものを基にこれらの知識の違いを理解しているわけではない．このことが，知識処理システムの適用範囲についての議論に混乱をもたらすという結果を招いている．ここでは THEMIS においてドメインとして利用する知識という観点から宣言的知識，手続き的知識の違いを論じ，その性質からモデル推論における取り扱いの差を論じる．

宣言的知識と手続き的知識に漠然とした定義を与えると，宣言的知識とは何らかの判断をするための静的な知識であるのに対し，手続き的知識という概念には “操作” という要素をその中に含むように感じられる．このため手続き的知識の実行には，宣言的知識のそれと比較して人間にとり複雑で資源をより消費するという性質が伴うと考えられる．このことは学習者モデル構築においても同様で，手続き的知識についてのモデル推論をサポートする付加的な知識とメカニズムが必要であると考えられる．

手続き的知識の実行は宣言的知識よりも資源を消費すると仮定する．この仮定から，宣言的知識は一つ一つの知識単位の実行が簡単であり，いわゆる“別解”のような他の適用可能な問題解決知識を探索してそれによる検証を行ない易いのに対し，手続き的知識を用いた問題解決においては一回の問題解決にかかる手間が大きく，別解の探索や検証が困難であると考えられる．このことから，手続き的ドメインにおける人間の問題解決の顕著な特徴として挙げられる，ある問題解決手順で解に到達すると他の可能な手順をあまり実行･検証しようとしない，ということが説明できる．手続き的知識においては特に，ある問題に対してある人が持っているある問題解決知識を，その人がその問題を解く際に必ず適用するとは限らないということがいえると考えられる．

以上のことから手続き的知識の教育においては，“ある知識を持っているか”，“その知識を適用するとどのような結果が得られるか”ということだけではなく，“ある状況でその知識を適用するかどうか”ということが重要なポイントとなる．実際，宣言的知識を教育する際には，ドメインのインスタンスの属性にあたるファクト的な知識と，その様々な性質を判断するルール的な知識を積み上げてゆくことに重点が置かれることが多いように見受けられる．これに対して手続き的知識の教育の際には，宣言的知識で見られるような教育よりはむしろ，問題ごとに問題解決経路を通して教えることで“適用可能な知識のうちのどの知識を選択して適用するか”という知識の洗練に重点が置かれているように感じられる．

以上のような手続き的ドメインの性質は次のような適用オラクルを用いた探索の枝刈り戦略を THEMIS に導入可能であることを示唆している．ある問題にある手続きを適用したか，あるいはある属性の値を求めたかどうか，という質問に対する学習者の回答が得られることとする．このタイプの質問と解答の組を適用オラクルと呼ぶ．THEMIS が精密化グラフの探索を行なう際に，この適用オラクルをもとにしてある手続き知識単位をボディ部に持たない節を探索候補としないことにする．

手続き的知識を THEMIS の枠組に適用した場合，精密化グラフの探索空間が大きくなる上に，グラフの根から葉までの距離が小さい木になりがちである．この場合，精密化関係による枝刈りの効果があまり期待できなくなるが，適用オラクルはそのかわりの枝刈り手法として有効であると考えられる．

5.4.3 学習者の知識の矛盾を検出する際の対話について

3.4節で述べた多重世界矛盾の分離ヒューリスティック (MH) は学習者の応答の信頼度，すなわちオラクルの信頼度が判定できることを前提としている．しかし一般にオラクル自体の信頼度を判定することは困難である．本研究ではこの学習者の知識の矛盾の判断を，対話方略で補うことにしている．

新しく得られたオラクルが，そのオラクルが本来所属する世界の知識モデル中にある信頼度の高い節と，その節でそのオラクルのトップレベルトレースが構築されるはずの正解インスタンス知識で満足されない場合，既に述べたようにTHEMISは正解モデルが構築されている他の世界をテストしてみる．原因となったオラクルがある世界のモデルと正解インスタンスで満足される場合，THEMISは

(1) そのオラクルについて“本当にそう思うか?”などのような確認の質問を行なうか，あるいは

(2) 学習者が同じ知識を用いるような類題を出して，同様の誤りをするか確認する，

といった方法でそのオラクルがスリップなどに基づくものではないかどうかを検証する．

以上のような対話方略を用いることにより，THEMISは矛盾判別ヒューリスティックスを用いた矛盾の種類の判別を実現している．

5.4.4 THEMISの評価

表2.1と同様の基準でTHEMISを評価すると表5.1のようになる．THEMISは知識レベルの学習者モデルを論理型言語SMDLのプログラムとして帰納的に構築する．このため，THEMISが構築する知識モデルのバグ表現能力は高く，MF1，MF2，MSの全てのレベルのバグを表現できる．また，架空オラクルの生成によって教育的な考慮に基づく出題を自動的に行なう機構を持っている．そして，モデル構築プロセスをATMSの枠組の上で定式化することで，学習者の応答の矛盾に対処しながら学習者モデルを構築することができる．THEMISはこれらの能力をHSMISのレベルで実現している．

更にTHEMISでは，学習者の知識の矛盾の定式化に基づき，概念弁別木に基づく多重世界での学習者モデルを構築する能力を持っている．これにより，学習者の応答に含まれるノイズに対処するだけでなく，概念獲得段階に見られる学習者の矛盾した知識状態をモデル化することができる．学習者の知識の矛盾をモデル構築しようという他の枠

表 5.1: THEMIS と既存のモデル構築システムの比較

手法の名称	構築手法	MF1	MF2	MS	定式化の度合	質問生成	ノイズへの対処
THEMIS	**帰納的**	*yes*	*yes*	*yes*	**高**	*yes*	*yes*
オーバレイ	分析的	yes	no	no	低	—	no
[Hoppe93]	分析的	yes	yes	no	中	—	no
[Self93a]	分析的	yes	yes	no	高	yes	no
IDEBUGGY	帰納的	yes	yes	yes	低	yes	yes(不完全)
摂動	帰納的	yes	yes	yes	低	no	no
ACM/DPF	帰納的	yes	yes	yes	中	no	yes(不完全)

組としては Huang のシステム [Huang93] が挙げられるが，既に述べたように彼の枠組のモデル表現能力は命題論理の範囲にとどまっている．

本研究では “学習者の理解状態を同定する” という学習者モデル構築に本質的なタスク構造を抽出するという目的のために，学習者モデルの汎用なメカニズムを追求するというトップダウン的な研究アプローチに基づき THEMIS を設計してきた．その結果，THEMIS は学習者モデル構築機構の基盤技術として上で述べたような特長を備えるに至った反面，その汎用性とモデル構築能力の故にいくつかの，特に実用性の面で問題を抱えている．その一つがシステムの規模と動作時の計算量の問題である．

個々の教材の性質を利用してシステムを設計するというボトムアップ的なアプローチがとられたシステムでは，教材分析に基づいて制御構造を設計することにより，比較的容易に小規模で実用的なモデル構築システムを構築することができる．これに対して，THEMIS のプロトタイプを動作させ満足のゆく速度で運用するためには，EWS 程度の処理能力と記憶容量が必要となる．特に，実用的な規模の手続き的ドメインにおいて，教育に利用できる程度の精密さでモデル構築を行なうためには莫大な計算量を必要とする．この問題を軽減して実用的なシステムを構築するためには，教材分析に基づく知識を導入するというボトムアップ的な手法との融合が現状では必要となってくると考えられる．本研究においてもある程度のドメイン依存の制御知識を導入してきたが，制御構造の明確性を失わない範囲においてどれだけのドメイン依存知識をどこまで導入するかという方法論について実用性の観点からの検討が不可欠である．

THEMIS が持つもう一つの限界は，このシステムで扱える知識の範囲は Prolog 及び概念弁別木で記号化できるものに限られるということを原因とする．このことは現在の知識工学に基づく大部分のシステムと同様に，次のようなシステムの構築時における知識記述の負担，および運用における制約をもたらす．

THEMIS をベースにしたアプリケーションを構築するためにシステム構築者は，モ

デル化したい知識のプリミティブを記号化して宣言的に記述する必要がある．この記号化は現状では訓練を積んだ知識工学者でなければ困難なプロセスであり，THEMIS を実用的な枠組とするためには知識記述が容易でかつ効率的に行なえるオーサリングシステムを用意する必要がある．また，THEMIS が扱えるデータはあくまで記号化されたものに限られ，現状では入出力できるデータはテキストのみである．よって THEMIS では，例えばイメージやニュアンスなどを扱うことができない．教育においてはこれらの要素は重要な位置を占めており，このことが現状ではそれらの要素をコード中に埋め込むことができるドメイン分析に基づく手法の方が実用的であると評価されるゆえんでもある．THEMIS をより実用的に運用するためのアプローチとして，現在盛んに行なわれている情報をやりとりするための媒体，すなわちマンマシンインタフェースに関する研究成果と融合することが有効であると考えられる．このため，今後上の要素を取り扱うための記号化の方法論を検討し確立する必要がある．

5.5 結言

本章では多重世界矛盾の定式化に基づき，単一世界矛盾および多重世界矛盾を検出して統一的に扱うことができる新しい学習者モデル構築アルゴリズム THEMIS を提案した．概念弁別構造をモデル表現することにより，THEMIS は概念の獲得·弁別過程にある学習者の状態を学習者モデル構築の対象とすることを可能とした．THEMIS はソクラテス式教授をはじめとする高度な教育行動を生成するための情報を教授システムに提供することができる．

第 6 章

結論

本章では本研究で得られた成果を総括し，今後に残された課題について検討する．

第 2 章では本研究においてシステム設計の基礎とした，学習者モデル構築システムにおける様々な評価指針を整理した．また同時に，これまでに提案されてきた代表的な学習者モデル構築システムについて構築手法 (分析的，帰納的)，表現能力 (機能の不良，構造の不良) などの観点から分類·評価した．その上で，

- 複数例題を入力とする帰納推論をベースに確固としたモデル構築アルゴリズムを定式化すること，
- モデル構築過程における曖昧性を解消するために教育的に適切な量の質問を学習者に行なうことができる枠組とすること，
- モデル構築の場面で発生する様々な種類の矛盾を定式化の基準とし，これらの矛盾を扱うことができるモデル構築システムを開発すること，

を THEMIS の設計指針として採用した．

第 3 章では，学習者モデル構築システムの設計において考慮すべき様々な矛盾について分類·分析した．学習者モデル推論アルゴリズムが扱うべき矛盾は，その原因という観点から学習者の矛盾とモデリング仮説の矛盾の二種類に分類される．このうちの学習者の矛盾は，理解の変化による応答の矛盾，スリップによる応答の矛盾，それに学習者の知識の矛盾の三種類に細分される．次にこれらにモデリング仮説の矛盾を加えた四種類の矛盾をモデル構築における取り扱い方の観点から検討し，単一世界矛盾と多重世界矛盾の二種類に再分類した．またこれらの矛盾を分離するためのヒューリスティックスを整

理した．次にこれらの分類･整理に基づいてTHEMISの基本設計を行なった．THEMISはHSMISと多重世界制御機構MWCをサブシステムとして持ち，

- HSMISが単一世界矛盾を検出･解消することで推論の無矛盾性を保ちながら各単一世界のモデルを構築し，
- MWCが概念弁別木を更新することで多重世界矛盾を扱い，学習者の概念構造をモデル構築する，

という分担で統合的な学習者モデルを構築する．

第4章ではTHEMISにおいて単一世界矛盾を検出し解消することができる帰納推論に基づく学習者モデル構築アルゴリズムHSMISの定式化を行なった．HSMISにおいて単一世界矛盾は推論の各時点で立てられた仮定間の矛盾として定式化され，それらの仮定と仮定から導かれる推論データと矛盾，そして矛盾解消手続きがATMSの枠組の上で定義された．この定式化により，HSMISは学習者の理解の変化やスリップといった学習者の矛盾に対処しながら，一階述語論理のホーン節の範囲で学習者の理解状態のモデルを構築することができる．また，単一世界矛盾のうちのモデリング仮説の矛盾を定式化することで，帰納推論アルゴリズムを明確化すると共に，モデル構築過程での適切な質問などの柔軟な振舞いを実現することに成功した．HSMISは高いモデル表現能力と構築能力を持ったドメイン汎用の学習者モデル構築アルゴリズムとして実現されている．

第5章ではまず，多重世界矛盾，すなわち学習者の知識の矛盾を概念の未分化に起因するものとして多重世界論理に基づいて定式化した．そして概念弁別木の弁別条件のオーバレイという形による多重世界矛盾の知識表現方式を開発した．これらの基盤に基づいて多重世界矛盾を単一世界矛盾と同様にATMSの枠組の上で定式化し，二つの推論アーキテクチャを統合することでTHEMISを開発した．THEMISにおいてMWCは，単一世界のモデル構築サブシステムとしてHSMISを利用しながら概念弁別木のモデルを更新する．

以上，本研究では学習者モデル構築というタスクに本質的な矛盾を整理し，それを取り扱う学習者モデル構築システムの開発を行なった．本論文でも指摘したように，教授システムはそれが利用できる以上の精細度の学習者モデルを供給されたとしても，その情報を生かすことはできない．このことはFITSとTHEMISにおいても成立し，THEMISが構築する学習者モデルの情報を生かした高度な教授方略を開発する必要がある．その一例が本論文中でも挙げたソクラテス式対話である．

本研究で導入した多重世界モデルは学習者の概念弁別構造をモデル化しており，教授方略を高度化するための強力な基盤を提供すると筆者は考えている．近年，計算機ハードウェアのインフラストラクチャが急速に整備されるとともに，計算機主導で知識を宣言的に教授するだけではなく，学習者に適切な学習環境を与えることで概念形成の段階から学習者を支援しようというタイプの環境型 ITS が脚光を浴びてきている．学習者の状態に合わせた適切なオブジェクトを備えた学習環境をどのように動的に設定するか，という問題に対する解の一部分として，THEMIS は貢献すると思われる．

本論文で述べた枠組は，オブジェクト指向型 Prolog である Common-ESP[AIR91] を用いて UNIX ワークステーション上で構築が行なわれている．特に HSMIS については既に FITS のデモシステムに組み込んだ上で評価を行ない，複数の宣言的ドメインにおいてその動作を確認している．

謝辞

本研究の全過程を通じて，直接懇切なる御指導，御鞭達を賜わりました大阪大学産業科学研究所 溝口理一郎教授に衷心より深謝いたします.

本研究に関して貴重な御教示を頂きました大阪大学基礎工学部情報工学科 橋本昭洋教授，ならびに大阪大学産業科学研究所 豊田順一教授，北橋忠宏教授に心から感謝いたします.

大学院の全課程において御指導と御教授を賜わりました大阪大学基礎工学部情報工学科 嵩忠雄教授，菊野亨教授，都倉信樹教授，鳥居宏次教授，柏原敏伸教授，宮原秀夫教授，西川清史教授，首藤勝教授，谷口健一教授，村田忠夫教授，ならびに医学部 田村進一教授，教養部 藤井護教授に厚く御礼申し上げます.

本研究の遂行にあたり終始有益な御助言と御鞭撻を頂きました大阪大学産業科学研究所 池田満助手に厚く感謝の意を表します.

本研究の全般にわたり貴重な御討論，御助言を頂きました大阪大学産業科学研究所 山下洋一助手，平嶋宗助手，柏原昭博助手，ならびに来村徳信教務職員に深く感謝いたします．また，本研究に関して有益な御助言を頂きました関西大学工学部 野村康雄教授に感謝いたします.

更に，筆者の研究仲間であった奥畑健司氏 (野村総合研究所勤務)，時森健夫氏 (阪急電鉄勤務)，島崎克也氏 (住友金属工業勤務)，坂根謙一氏 (関西電力勤務)，ならびに森広浩一郎氏 (兵庫教育大学助手) には熱心な御討論と様々な面での御助力を頂いた．奥畑氏をはじめとする彼らの研究に対する真摯な姿勢と有形無形の叱咤に，敬意と感謝の念をもってここに記します．物理のドメインにおける学習者の知識の矛盾の例題を提供して頂いた和歌山県工業技術センターの石野久美子氏，ならびに本研究に関して御討論と御助言を頂いたドイツ GMD の Heinz Ulrich Hoppe 氏に感謝します．また，大きな御助力と御討論を頂いた溝口研究室 ITS グループの各氏に感謝いたします.

活発な御討論を頂いた溝口研究室の諸氏，産研 ITS グループ関係者各位，ITS 若手の会関係者各位に感謝いたします．そして，種々の面で御世話になりました溝口研究室の秘書の方々に深く感謝します.

最後に，終始あたたかく見守り励ましてくれた両親と妻 あゆみに感謝申し上げます.

参考文献

[池田88] 池田満, 溝口理一郎, 角所収: HMIS:仮説型モデル推論システム, 電子情報通信学会論文誌, Vol.**J71-D**, No.9, pp. 1761–1771, **1988**.

[池田89] 池田満, 溝口理一郎, 角所収: 学生モデル記述言語 SMDL と学生モデルの帰納推論アルゴリズム SMIS, 電子情報通信学会論文誌, Vol.**J72-D**, No.1, pp. 112–120, **1989**.

[池田92] 池田満, 溝口理一郎: ITS のための汎用フレームワーク FITS の開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol.**J75-A**, No.2, pp. 314–322, **1992**.

[上野89] 上野晴樹: 知識工学入門, オーム社, **1989**.

[岡本87] 岡本敏雄: 知的 CAI のための教授世界知識の表現とその推論の方法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.**J70-D**, No.12, pp. 2658–2667, **1987**.

[竹内87] 竹内章, 大槻説乎: 摂動法による学習者モデル形成と教授知識について, 情報処理学会論文誌, Vol.**28**, No.1, pp. 54–63, **1987**.

[AIR91] *CESP* 言語 第 *3* 版, (株)AI 言語研究所, 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1, **1991**.

[Brown78] Brown, J. S. and Burton, R. R.: Diagnostic Models for Procedual Bugs in Basic Mathematical Skills, *Cognitive Science*, Vol.**2**, pp. 155–293, **1978**.

[Burton82] Burton, R. R.: Diagnosing Bugs in a Simple Procedural Skill, In Sleeman, D. and Brown, J. S. (eds.), *Intelligent Tutoring Systems*, Academic Press, London, **1982**.

[Carr77] Carr, B. and Goldstein, I.: Overlays:A Theory of Modeling for Computer Aided Instruction, *MIT AI Memo 406*, **1977**.

[Chandrasekaran86] Chandrasekaran, B.: Generic Tasks in Knowledge Based Reasoning: High-level Building Blocks for Expert System Design, *IEEE EXPERT*, Vol.**1**, No. 3, pp. 23–30, **1986**.

[Clement82] Clement, J.: Students' Preconceptions in Introductory Mechanics, *American Journal of Physics*, Vol.**50**, pp. 66–71, **1982**.

[Clancey87] Clancey, W. J.: *Knowledge-based Tutoring: The GUIDON Program*, MIT Press, **1987**.

[deKleer86] de Kleer, J.: An Assumption-based Truth Maintenance System, *Artificial Intelligence*, Vol.**28**, pp. 127–162, **1986**.

[deKleer87] de Kleer, J. and Williams, B. C.: Diagnosing Multiple Faults, *Artificial Intelligence*, Vol.**32**, pp. 97–130, **1987**.

[Dillenbourg89] Dillenbourg, P.: Designing a Self-improving Tutor: PROTO-TEG, *Instructional Science*, Vol.**18**, pp. 193–216, **1989**.

[Dillenbourg92] Dillenbourg, P. and Self, J.: A Framework for Learner Modelling, *Interactive Learning Environments*, Vol.**2**, No.2, pp. 111–137, **1992**.

[Hoppe91] Hoppe, H. U.: An Annalysis of EBG and Its Relation to Partial Evaluation: Lessons Learned, *Arbeitspapiere der GMD*, **1991**.

[Hoppe93] Hoppe, H. U.: Deductive Error Diagnosis and Inductive Error Generation for Intelligent Tutoring Systems, *Journal of Artificial Intelligence in Education*, **1993** (to appear).

[Huang91a] Huang, X., McCalla, G. I., Greer, J. E. and Neufeld, E.: Revising Deductive Knowledge and Stereotypical Knowledge in a Student Model, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol.**1**, pp. 87–115, **1991**.

[Huang91b] Huang, X., McCalla, G. I. and Neufeld, E.: Using Attention in Belief Revision, In *Proceedings of AAAI-91*, pp. 275–280, **1991**.

[Huang93] Huang, X.: Inconsistent Beliefs, Attention, and Student Modeling, *Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.**3**, No.4, pp. 417–428, **1993**.

[Laird87] Laird, J. E., Newell, A. and Rosenbloom, P. S.: SOAR: An Architecture for General Intelligence, *Artificial Intelligence*, Vol.**33**, pp. 1–64, **1987**.

[Langley84] Langley, P. and Ohlsson, S., Automated Cognitive Modeling, In *Proceedings of AAAI-84*, pp. 193–197, **1984**.

[Langley90] Langley, P., Wogulis, J. and Ohlsson, S.: Rules and Principles in Cognitive Diagnosis, In Frederiksen, N., et al. (eds.), *Diagnostic Monitoring of Skill and Knowledge Acquisition*, pp. 217–250, Lawrence Erlbaum, **1990**.

[Mitchel84] Mitchel, T. M., Utgoff, P. E. and Banerji, R.: Learning by Experimentation: Acquiring and Refining Problem Solving Heuristics, In Michalski, R. S., Carbonell, J. G. and Mitchel, T. M. (eds.), *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*, Springer-Verlag, New York, **1984**.

[Mizoguchi87] Mizoguchi, R., Ikeda, M. and Kakusho, O.: An Innovative Framework for Intelligent Tutoring Systems, In *Proceedings of IFIP TC3 Working Conference on AI Tools in Education*, pp. 105–120, Fascati, Italy, **1987**.

[Mizoguchi91] Mizoguchi, R. and Ikeda, M.: A Generic Framework for ITS and Its Evaluation, In Lewis, R. and Otsuki, S. (eds.), *Advanced Research on Computers in Education*, pp. 63–72, North-Holland, **1991**.

[Self88] Self, J.: Bypassing The Intractable Problem of Student Modelling, In *Proceedings of ITS'88*, pp. 18–24, Montréal, Canada, **1988**.

[Self92] Self, J.: Supporting The Disembedding of Learning, In *Proceedings of East-West Conference on Emerging Computer Technologies in Education*, pp. 281–286, Moscow, Russia, **1992**.

[Self93a] Self, J.: Model Based Cognitive Diagnosis, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol.**3**, pp. 89–106, **1993**.

[Self93b] Self, J.: Formal Approaches to Student Modeling, In McCalla, G. I. and Greer, J. (eds.), *Student Modelling*, Springer-Verlag, **1993** (to appear).

[Shapiro81] Shapiro, E. Y.: *Inductive Inference of Theories from Facts, Yale University Research Report 192*, (有川訳, 「知識の帰納的推論」, 共立出版), **1981**.

[Shapiro82] Shapiro, E. Y.: *Algorithmic Program Debugging*, MIT Press, **1982**.

[Stevens77] Stevens, A. L., and Collins, A.: The Goal Structure of a Socratic Tutor, In *Proceedings of National ACM Conference*, pp. 256–263, **1977**.

[Wenger87] Wenger, E.: *Artificial Intelligence and Tutoring Systems*, Morgan Kaufmann Publishers, California, **1987**.

[Woolf93] Woolf, B. P. and Murray, T.: Using Machine Learning to Advice a Student Modeling, *Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol.**3**, No.4, pp. 401–416, **1993**.