

問題の作成によるプロダクションシステムの学習

Learning production system from problem posing

森田純哉^{*1}

Junya Morita

三輪和久^{*2}

Kazuhisa Miwa

中池竜一^{*3}

Ryuichi Nakaike

寺井仁^{*4}

Hitoshi Terai

齋藤ひとみ^{*4}

Hitomi Saito

^{*1}北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology

^{*2}名古屋大学

Nagoya University

^{*3}京都大学

Kyoto University

^{*4}東京電機大学

Tokyo Denki University

^{*5}愛知教育大学

Aichi University of Education

Computational cognitive modeling, especially production system modeling is a central approach in cognitive science. However there are only a few researches that aim to support skill acquisitions in cognitive modeling. The authors have developed a learning support system for production system modeling and designed a class of cognitive modeling. This study proceeds our previous study by developing a user interface of the developed learning support system, which can be used in cognitive science classes. The user interface support problem posing and model development by visualizing problem situations and scaffolding rule coding. The authors consider whether our user interface promote user's situation awareness and understanding of rule concepts.

1. はじめに

計算機上に認知のモデルを構築することは、認知科学の進展を支える重要な研究アプローチである。認知モデルを構築することをおし、研究者の仮定に含まれる矛盾が発見される。また、構築されたモデルの実行により、人間の認知に関する新たな仮説が得られる [Fum 07]。

本研究はプロダクションシステムによる認知モデルの学習を支援するツールを開発する。これまで、プロダクションシステムは多くの認知モデルのフレームワークとして用いられてきた。たとえば、現在の認知モデルの主流である ACT-R [Anderson 04]、Soar [Newell 94] などのアーキテクチャはプロダクションシステムを根幹に据える。

認知モデルの構築にプロダクションシステムが利用される理由として、知識表現の容易さを挙げることができる。プロダクションシステムは、手続き的知識をルールとして記述する。プロダクションシステムにおいて、ルールは相互に独立なモジュールである。そのため、モデルへのルールの追加は比較的容易であり、人間の認知をモジュールの集合として理解することができる [Lovett 05]。

また、プロダクションシステムに格納されるルールは、変化する状況に応じて動的に発火する。発火するルールの選択は、プロダクションシステムの保持するワーキングメモリ (WM: Working Memory) の状態とルールの条件節との照合による。ルールの発火により、WM の状態が変化し、新たなルール選択が続く。この照合・選択・発火のサイクル (認知-実行サイクル) は、モデルの柔軟性を高め、人間の思考プロセスや行動系列のシミュレーションを実現する。

しかし、プロダクションシステムによる認知モデリングは、初心者にとって容易ではない。プロダクションシステムに限定したことはないが、認知モデルの多くは視覚的イメージを記号により表現する。例えば、箱 A が箱 B の上に置かれるという状況は、述語論理的表現により、(On 箱 A 箱 B) などのように表現される。視覚的イメージを記号で表現することの是非

は古くから議論されているが、本研究ではその問題については考察しない。しかし、記号的な視覚的イメージの表現による認知負荷の高まりについては、注意をすることがある。視覚的イメージを表現するためには、膨大な量の記号が必要となる。また、視覚的イメージは 2 次元的に情報を配置するのに対し、記号表現は情報を 1 次元的に配置する。そのため、情報間の結合が失われ、情報の認識や探索に負荷が生じる [Larkin 87]。

2 つめの困難さは、変数束縛に関わるものである。変数概念の理解に関わる問題は、一般的なプログラミング教育にも存在する。だが、プロダクションシステムによるモデリングは、ルールの発火に関与する変数の数が多い。また、プロダクションシステムには明示的な制御構造が存在せず、変数への値の代入が直接的になされない。変数への値の束縛は、状況と条件節の照合 (パターンマッチング) の末になされる。そのため、プロダクションシステムのモデリング技術を取得するためには、パターンマッチングの理解が必須となる。また、パターンマッチングによるルールの選択は、プロダクションシステムの柔軟性を支える重要な特質であり、この部分の理解をサポートすることが必要である。

2. 関連研究

2.1 認知モデリングの支援

ここまでに述べた困難さを背景とし、認知モデリングの開発を支援しようとする研究がなされている [Ritter 09]。たとえば、ACT-R のモデル記述をシンプルなものにする高次言語が開発され [Salvucci 03]、人間行動の記録に基づく自動的なユーザモデル構築の手法が開発されている [John 04]。

ただし、これら ACT-R によるモデリングの支援に関する研究は ACT-R を日常的に用いる専門家をユーザーとし、初学者の利用を想定するものではない。それに対し、著者らは認知モデリングの初心者を対象とした学習支援に関わる研究を行ってきた。

2.2 教育用プロダクションシステムの開発

著者らは教育用のプロダクションシステムとして、どこでもプロダクションシステム (どこプロ) を開発した [Nakaike 09]。

連絡先: 森田純哉, 北陸先端科学技術大学院大学, 石川県能美市旭台 1-1, 0761-51-1707, j-morita@jaist.ac.jp



図 1: どこプロの概観 [Nakaikie 09].

ユーザは端末からブラウザを介してサーバにアクセスするだけで、どこプロを用いることができる。このような Web アプリケーションとしての特質により、授業における環境の導入が容易になり、学習者の自習を支援することができる。

端末とサーバ間の通信には Ajax (Asynchronous JavaScript and XML) を多用した。旧来の Web アプリケーションの弱点として、画面上で何らかの操作を行なうたびに無用なページ遷移が生じることが挙げられる。どこプロは、Ajax の利用により、極力ページ遷移を減らし一つの画面上で全ての操作ができるよう開発された。

また、サーバ側の処理は、Ruby on Rails (RoR)^{*1} を用いることで実装した。リレーショナルデータベースに WM やルールが格納され、SQL 文によるデータベース照合により、WM の状態とルールの条件節とのパターンマッチングがなされる。

図 1 はどこプロのスクリーンショットである。どこプロのユーザは、図 1 に示されるコントローラを用いることで推論のステップを操作する。右矢印は推論を進め、左矢印は WM の状態を 1 ステップ前に戻す。"CHECK ALL" ボタンは、各ステップにおいて形成された変数束縛リストにアクセスするためのものである。アクセスされた変数束縛リストは、メッセージウィンドウに表示される。

2.3 問題の生成と共有による学習

認知モデリングのスキル獲得には、長時間にわたる個別学習が要求される。しかし、困難の大きい認知モデルの個別学習は、多くの学習者の興味を失わせる結果になりがちである。そのため、認知モデリングの授業を成功させるためには、学習者の個別学習を動機づける方法を工夫する必要がある。一般的に、学習における動機づけの効果的な方法は、協調の文脈を設定することである。

また、認知モデルの学習には、モデルの対象となる問題の設定、問題に対するモデルの構築という 2 つの側面がある。著者らの授業デザインでは、問題の設定において協調の文脈を、モデルの構築において競争が生起する文脈を設定した [Miwai 09].

問題の設定は、授業の初期において行われた。なお、問題の基本的な領域は、高校物理などで扱われる滑車の原理に関わる問題であった。この課題は、プロダクションシステムモデルの古典的な研究 [Larkin 87] において扱われた問題であり、認知モデルの初歩的な学習に適していると考えた。学習者は滑車の

問題の範囲内において、プロダクションシステムによって解決しうる問題を考案した。

各授業参加者により考案された問題は回収され、授業参加者で共通する問題集が構築された。問題の考案は個別に行われたが、全体としてみれば、バリエーションの豊かな問題集を構築するという共通の目的に向けた協調的活動が行われたといえることができる。

その後のフェーズでは、問題集が学習者に配布され、学習者は問題集に含まれる出来るだけ多くの問題を解決するモデルを構築することが求められた。このような授業により、ほぼ全ての学習者に自ら問題を設定し、問題を解決するモデルを構築するスキルを身につけさせることに成功した。

2.4 本研究の狙い

ここまで示したように、著者らは認知モデルの学習をサポートするシステム、授業デザインを構築してきた。しかし、これまでの取り組みは未だ十分なものとはいえない。例えば、2.3 節で述べた授業は、半期の授業の大部分を用いた。認知モデルの専門的な講義でなければ、このような長期にわたる授業を実施することは困難である。認知モデリングの魅力も多く多くの学生に伝えるためには、導入の期間をより短くする必要がある。

そこで、本研究では、認知モデル学習のハードルを下げ、その魅力を伝えるための支援環境を構築することを目指した。支援環境の持つべき要件として、これまでの議論を踏まえつつ、以下の特徴を設定した。

1. 視覚的イメージと記号を結び仕組みを用意する。
2. 問題の生成と共有を簡便なものとする。
3. ユーザ自身の操作をルールの生成に結びつける。
4. パターンマッチングを視覚的に理解する。

1 つめの特徴は、1 節にて述べた視覚的イメージを記号により表現することの困難さに由来する。2 つめの特徴は、2.3 節で示した授業実践を進展させるものである。3 つめと 4 つめの特徴はプロダクションシステムの中心的な概念であるルール、および変数束縛を理解させるための特徴である。本研究では、これらの特徴を持つ支援環境を実現するために、新たにどこプロを操作するユーザインタフェースを開発した。

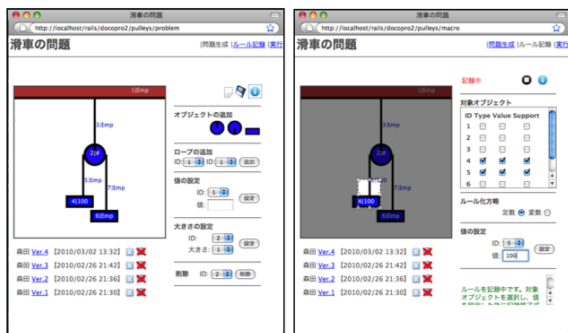
3. ユーザインタフェース

3.1 構成

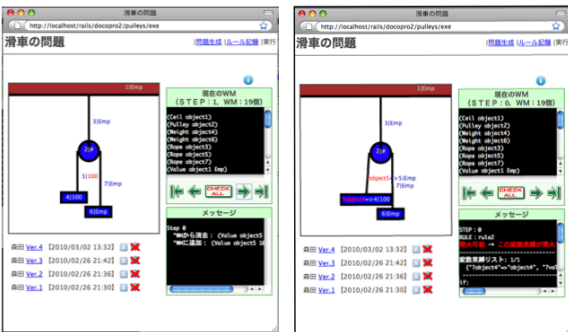
開発されたユーザインタフェース (以下、MIPP: Modeling Interface for Pulley Problem) は、課題領域として滑車の問題を対象とし、どこプロのメイン画面からポップアップウィンドウとして立ち上がる。

MIPP は、Image Display, Problem builder, Rule recorder, Inference Controller と呼ばれる Web ページ (rhtml ファイル) を持つ。これらのページは、2.4 節で示した 4 つの特徴をそれぞれ実現するものである。なお、Problem builder, Rule recorder, Inference controller はそれぞれ独立したページとなっており、Image display は他のページに組み入れられる部分的なページである。図 2 に MIPP のスクリーンショットを示す。

*1 <http://rubyonrails.org/>



a. 問題生成の画面 b. ルール記録の画面



c. 実行画面における推論結果の表示 d. 実行画面におけるヒント表示

図 2: MIPP のスクリーンショット.

3.2 Image Display

Image Display は WM の状態を視覚的に表現する．Image Display に表示されるオブジェクトは，天井，2 種類の滑車（動滑車，定滑車），おもり，ロープである．それぞれのオブジェクトには，ID と値（張力，重さ）が表示される（「 | 」の左に ID，右に値を示す）．

3.3 Problem builder

Problem builder は，Image Display 上にオブジェクトを配置し，問題（WM の初期状態）を定義する．オブジェクトの追加，削除は図 2a 右に配置されるメニューを介して行う．また，「値の設定」に示されるプルダウンメニュー，テキストボックスにより，WM の初期状態におけるオブジェクトの値を設定する．

Image display の状態は，自動的にどこプロの WM に書き出される．WM の記述には，述語と引数からなるリストを用いる．述語には，“Ceil”，“Pulley”，“Weight”，“Rope”，“Support”，“Value” の 6 つが用いられる．はじめ 4 つの述語は，Image Display 上のオブジェクトの種類を区別するものである．“Support” はオブジェクト間の支持関係を示す．上部に配置されるオブジェクトを第 1 引数，下部に配置されるオブジェクトを第 2 引数とする．“Value” はオブジェクトの値の状態を表し，第 1 引数にオブジェクトの ID，第 2 引数にオブジェクトの値を示す．

図 2a の Image Display から書き出される WM の状態を表 1 に示した．ユーザは基本的に，このような WM の表現に従い，問題を解決するモデル（オブジェクトの値を埋めるモデル）を構築することになる．

なお，Problem builder により構築された問題は，MIPP のデータベース（Pulley data）に保存される．データベースは，ユーザ間で共通のものが用いられるため，授業における問題の

表 1: WM の例

(Ceil object1)	(Pulley object2)
(Weight object4)	(Weight object6)
(Rope object3)	(Rope object5)
(Rope object7)	(Value object1 Emp)
(Value object4 100)	(Value object6 Emp)
(Value object3 Emp)	(Value object5 Emp)
(Value object7 Emp)	(Support object1 object3)
(Support object3 object2)	(Support object2 object5)
(Support object5 object4)	(Support object2 object7)
(Support object7 object6)	

共有が容易になる．

3.4 Rule recorder

Rule recorder は，プロダクションルールの基本的性質（手続き的知識，ルールの焦点，変数と定数の区別）を学習者に体験的に理解させるものである．

プロダクションルールは，状況进行操作する手続き的知識である．逆にいえば，状況の変化を観察することで，状況操作するルールを構成することができる [John 04]．単純に言えば，WM の状態 WM_t から WM_{t+1} を導くルールは，条件節に WM_t ，実行節に WM_t と WM_{t+1} の差分を持つものである．

ただし，実際には， WM_t に含まれる全ての項目を，条件節に含むルールを考えることは妥当ではない．人間は直面する状況のうち，注意を向けた情報のみを処理する．よって，人間の手続き的知識と対応するプロダクションルールは， WM_t の一部の要素を条件節にもつものと仮定できる．そして，条件節に含まれる要素は，そのルールの焦点を表すものと考えることが

できる．また，ルールは，変数を含むか否かという観点からも区別できる．定数のみで構成されるルールは，個別の状況においてのみ発火する事例的ルールであり，変数を多く含むルールは多様な状況において発火する汎用的ルールということができる．ルールに含まれる変数が増加すれば，その汎用性は高まるが，適切ではない状況においてルールが発火する危険性も高くなる．

Rule recorder において，ユーザは事前に構成された Image display に対し操作（値の設定）を行う．また，ユーザはルールの焦点を Image display 上の矩形（図 2b における点線の枠），あるいはチェックボックスによって決定する．さらに，画面右の下側に配置されるラジオボタンにより，「定数（変数を含まないルールを構成）」あるいは「変数（全てのオブジェクトを変数に置き換えたルールを構成）」を選択する．最後に，「記録」ボタンをクリックすると，ルールが構成され，どこプロのルールデータベースに格納される．

図 3 は，図 2a から図 2b の状態に Image display を操作した後に構成されるルールである．rule1 はラジオボタンから「定数」を選択することで構成されるルールであり，rule2 は「変数」を選択することで構成されるルールである．ユーザは，このように記録されたルールを観察することで，プロダクションシステムにおけるルールの概念を理解すると考えられる．また，これらのルールを足場かけ（スキヤフォールド）とし，適宜修正していくことで，問題を解決するモデルを構成できる．

3.5 Inference Controller

MIPP の Inference controller はどこプロと同様のコントローラを持ち，どこプロの推論エンジンに接続する．Inference controller により推論を進めると，Image display 上のオブジェクトの値が書き変わっていく（図 2c）．

また，MIPP の Inference controller から変数束縛リストを

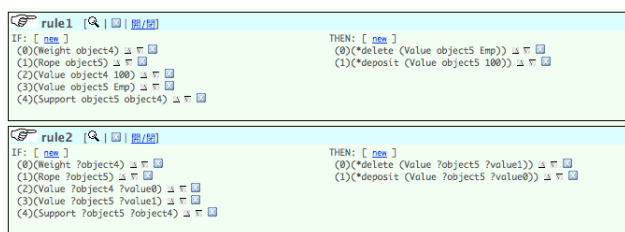


図 3: ルールの例 (?は変数, *は関数を表す) .

表 2: アンケート結果

	推論の視覚化	ルール記録	ヒント
参加者 A	2	4	5
参加者 B	1	5	5

注. *は 5%水準で有意な相関 ($n = 11$) .

表示させた場合, その結果は, Image Display 上に表示される (図 2d) . 著者らは, 変数束縛を Image display 上へ重ね合わせて表示することが, ユーザの状況認識を促進させると考える .

4. 事例的評価

4.1 目的

MIPP を実験参加者に利用させる実験を実施した . この実験は, システムの支援機能を直接評価するというよりも, システムの問題点を発見することに主眼をおいた .

4.2 方法

実験には 2 名のポストドクターが参加した (以降, 参加者 A, 参加者 B) . 両参加者は一般的なプログラミングに関する経験は保持したものの, プロダクションシステムに関する学習経験はなかった .

実験において, 参加者は滑車の問題を提示された . その後, 提示された問題を解決するモデルを制限時間 2 時間半の間に構築することを求められた . 実験の最後に, MIPP の「推論の視覚化機能」, 「ルール記録機能」, どこプロの「ヒント機能」の学習支援としての有用性を 5 段階で評価させた .

4.3 結果と考察

表 2 にアンケート結果を示す . 両参加者ともに, 推論の視覚化に対する評価が低く, ルール記録, ヒントに対する評価が高いものとなった .

推論の視覚化に対する評価が低いものとなったことの原因を探るために, 課題中の各機能の使用時間を検討した . 図 4 における問題生成, ルール記録, ルール修正, 実行 (I), 実行 (D), ヒント (I), ヒント (D) は, それぞれ図 2a, 図 2b, 図 1 右側, 図 2c, 図 1 左上側, 図 2d, 図 1 左下部に示される機能を使用した時間を示している .

図 4 から MIPP 上での操作に比べ, どこプロのインタフェース上での操作が多く行われていたことが分かる . 特に, 実行結果やヒント情報は, MIPP において視覚的に示されるにも関わらず, どこプロのインタフェース上で閲覧されたことになる . 著者らは, このことが原因でアンケートにおける推論の視覚化にたいする評価が低下したと考えている . 今後, MIPP における推論の視覚化を促す画面設計上の工夫が必要になる .

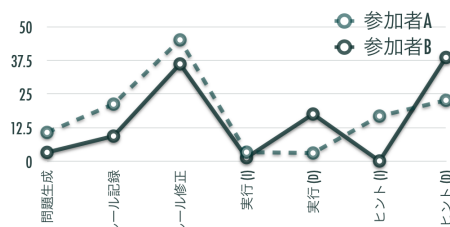


図 4: 各機能の使用時間 .

5. まとめ

本研究では, 認知モデルの構築を支援するユーザインタフェースを示した . 構築されたユーザインタフェースは, 視覚的イメージと記号を結び (Image display), 問題の生成を簡便にする (Problem builder) . また, ユーザ自身の操作とルールの生成を結びつけることでルール概念の理解を促し (Rule recorder), 変数束縛の結果を視覚的イメージ上に表示することでパターンマッチングの理解を促す (Inference controller) .

著者らは, ここで示したユーザインタフェースが, 認知モデルに対する学習者の理解を促進させると考えている . 今後, ここで開発したユーザインタフェースを用い, 実験と実践を実施する予定である .

謝辞

本研究は科研費 (19300089,20730498) の助成を受けたものである

参考文献

- [Anderson 04] Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., and Qin, Y.: An integrated theory of the mind, *Psychological Review*, Vol. 111, pp. 1036–1060 (2004)
- [Fum 07] Fum, D., Missier, F. D., and Stocco, A.: The cognitive modeling of human behavior: Why a model is (sometimes) better than 10,000 words, *Cognitive Systems Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 135–142 (2007)
- [John 04] John, B. E., Prevas, K., Salvucci, D. D., and Koedinger, K.: Predictive human performance modeling made easy, in *Proceedings of CHI2004*, pp. 455–462 (2004)
- [Larkin 87] Larkin, J. H. and Simon, H. A.: Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words, *Cognitive Science*, Vol. 11, No. 65–100 (1987)
- [Lovett 05] Lovett, M. C. and Anderson, J. R.: Thinking as a production system, in Holyoak, K. J. and Morrison, R. eds., *Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*, pp. 401–430, Cambridge University Press, NY (2005)
- [Miwa 09] Miwa, K., Nakaike, R., J., M., and Terai, H.: Development of Production System for Anywhere and Class Practice, in *Proceedings of the 14th International Conference of Artificial Intelligence in Education*, pp. 91–99 (2009)
- [Nakaike 09] Nakaike, R., Morita, J., Miwa, K., and Terai, H.: Development and Evaluation of a Web-based Production System for Learning Anywhere, in *Proceedings of the 17th International Conference on Computers in Education* (2009)
- [Newell 94] Newell, A.: *Unified Theories of Cognition*, Harvard University Press (1994)
- [Ritter 09] Ritter, F. A.: Two Cognitive Modeling Frontiers, *人工知能学会論文誌*, Vol. 24, No. 2, pp. 241–249 (2009)
- [Salvucci 03] Salvucci, D. D. and Lee, F. L.: Simple cognitive modeling in a complex cognitive architecture, in *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 265–272 (2003)