

特集 「認知科学におけるモデルベースアプローチ」

認知モデリングにおける二つのフロンティア —感情とユーザビリティ—

Two Cognitive Modeling Frontiers —Emotions and Usability—

Frank E. Ritter College of Information Sciences and Technology, Pennsylvania State University, U. S. A.
frank.ritter@psu.edu, <http://www.frankritter.com>

訳者:

森田 純哉
Junya Morita

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology.
j-morita@jaist.ac.jp

Keywords: cognitive science, cognitive engineering, hybrid architectures, emotions, Soar, ACT-R, CoJACK.

1. はじめに

本論文は、感情をハイブリッド認知アーキテクチャに組み入れる方法をレビューする。ハイブリッドアーキテクチャとは、シンボリックアーキテクチャと下位レベルのサブシンボリックアーキテクチャの利点を組み合わせたものである。シンボリックな処理は、人工知能やエージェントアーキテクチャの本質に基づくものである。シンボリックな処理により、モデルは、相対的に大きく複雑な課題に取り組むことができる。サブシンボリックな要素は、微妙だが重要な方法で、そのパフォーマンスを修正する。このようなハイブリッドアーキテクチャは、近年に至り、ますます有効になってきている。

これら（そしてほかのモデル）を構築し、再利用し、理解するためには、いくつかの問題が残されている。このレビューは、一層の研究を触発し、認知科学工学という領域について記すことを意図している。

ここで記す問題は十分に大きく、誰もが同じように追求できる。実際、その問題は複数の研究者を必要とし、多数の応用があり、我々は支援を求めている。

このレビューでは、著者が考えていることを示し、著者が現在従事しているプロジェクトを中心に記述する。より長く、完全なレビューは [Pew 98, Pew 07, Ritter 03b] を参照されたい。これらに、地理的・研究分野的により広い範囲の研究が示される。

2. ハイブリッドアーキテクチャ

認知アーキテクチャとは、ユーザやタスクに関わらない固定した認知のメカニズムを記述するアプローチである

[Anderson 07, Newell 90]. 認知アーキテクチャは、作業記憶などの認知心理学上の概念を用いる。そして、それらを、知識表現としての計算機プログラムに実装し、行動を生み出す。用いられる知識表現は、典型的にはルールであるが、プランなどを含めることもできる。つまり、その言語は、知識とその適用方法に関する表現をもつ。AI システムと比べたとき、認知アーキテクチャは、処理に時間をかけることを意図的に狙う点、人間の知識適用における限界をシミュレートする点で異なる。また、認知アーキテクチャは、しばしば正しい知識が適用されない、あるいは知識が正しく適用されないなどのエラーを備える。

ハイブリッドアーキテクチャは、異なるレベル、または根本的に異なる 2 種類の知識表現をもつ認知アーキテクチャと定義できる。ハイブリッドアーキテクチャは三つの方法によって生みだされる。一つの方法は、コネクショニスト的な表現に記号を加えるものである（例えば、[Sun 94, Touretzky 86]）。この分野の研究は、コネクショニスト表現を通して、記号、もしくは構造を生成する手段を提案する。

別の手法は、サブシンボリックな表現をシンボリックアーキテクチャに取り入れるものである。例えば、ACT-R における言語的記憶の強度や Soar 9 [Laird 08] における強化学習がこれにあたる。これらにおいて、ルールや宣言的記憶の要素に割り当てられる重みは、シンボリックアーキテクチャを漸進的に変化させる本質的な手段となる。

多くのハイブリッドアーキテクチャは、これら二つの方法で実現される。しかし、進化アルゴリズム、ファジ理論、その他の表現を用いる例も存在する。ハイブリッドアーキテクチャに関するレビュー（例えば、[Kandel 92]）や、ハイブリッドアーキテクチャのさらなる事例は、いくつかの国際会議にて得ることができる。

ここでは、認知アーキテクチャに特別詳しくない読者のために、三つの高次ハイブリッドアーキテクチャをレビューする。

2.1 Soar と ACT-R

Soar と ACT-R は、最もよく用いられる認知アーキテクチャといえる。これらは、人間による課題遂行のモデルを構築するための、概念的フレームワークを提供する。ここでのレビューは、Soar と ACT-R に関する先行するレビュー [Ritter 03b] を更新し、それを補足するものである。

Soar と ACT-R は、認知理論を実現する計算機プログラムによって支えられている。計算機プログラムと理論が異なるのか、あるいはどのように異なるのかという問題について、いくつかの議論がある。しかし、これらはかなり関連しあっていると見てよいだろう。プログラムが理論を実装するものであることは一般的に認められている。また、理論には存在しないものの、実行可能なシステムをつくるためになされる貢献が、プログラミングに存在することも一般的に認められている。現在の理論は、これらを別々のものとして扱っていない。

認知アーキテクチャの設計者は、人間行動のすべての側面をモデル化することを目指す。ここで扱うものも含め、認知アーキテクチャは、多かれ少なかれ適用可能な範囲をますます増大させている。

Soar と ACT-R に関するより詳細な比較は、[Johnson 98, Kennedy 06, Ritter 03a], もしくは Soar と ACT-R のホームページや FAQs, Soar Wikiなどを参照されたい。

§ 1 Soar と ACT-R の背景

Soar と ACT-R は、いくつかの理論的仮定に基づいている。それらの仮定には、異なる概念的な起源が大きく反映される。Soar は三つの主要な要素を組み合わせることで開発された。(a) 知識依存で、困難な課題に対するヒューリスティックな探索アプローチ、(b) 日常的問題解決に対する手続き的な観点、(c) 学習のべき乗則を生み出すボトムアップ学習のシンボリックな理論である。しかしながら、Soar の理論的仮定における制約の多くは、人間行動を詳細に説明するというより、知的エージェントの一般的な特性を構成するものとなっている。Soar の立場は、AI の伝統に由来するものであり、パフォーマンスに方向づけられている。

それに対して、ACT-R は、記憶、学習、問題解決に関する詳細な現象から生み出された [Anderson 73, Anderson 83, Anderson 07]。それゆえ、ACT-R はより下位の現象や、反応時間を予測 (特に 10 秒以下の課題) することに適している。ACT-R の立場は、実験心理学的伝統に由来するものであり、反応時間の平均値や分布を予測することに方向づけられている。

これらの差異は相対的なものである。二つのアーキテクチャは、ともに高次と低次のモデル両者に用いられる。両者とも、モデリングにおける注意は、パフォーマンスと反

応時間の予測の両方に向けられる。これらのアーキテクチャのホームページには多数の事例が提供されている。

§ 2 Soar と ACT-R の類似性

Soar と ACT-R は、多くの点で類似しているとみなせる。表現こそ異なるものの、両者は、宣言的 (事実)、手続き的 (ルール) という二つの記憶をもつ。現在、二つのアーキテクチャは、一般的に、知覚のモデルを介した入力、運動のモデルを介した出力を実装する [Byrne 01, Chong 01, Ritter 00]。

Soar と ACT-R の両者は、人間の行動の多くを、問題解決行動としてモデル化する。Soar はこれを Newell の問題解決に関する理論 (PSCM: Problem Space Computational Model) に即する形で明示的に行い、ACT-R は目的志向的な方法をとることで、暗示的に行う。

両アーキテクチャの保持する記憶は、概念的に無限である。ACT-R の場合、時間や使用頻度を要因として、記憶項目の活性が低下するが、項目が完全に除去されることはない。Soar と ACT-R の両者は、ゴールに関する宣言的記憶を除いている。よって、それは短期記憶の一種のようにみなせる。手続き記憶に関して、新たなルールが両アーキテクチャに付け加えられることもある。しかし、いったん付け加えられたルールが除去されることはない。

これらの処理の流れは、初期状態から特定のゴール状態に向けた動作を含んでいる。ACT-R は、単一のゴールのみを活性させる (記憶構造として、ゴールが充足される内的・外的状況が複数存在し得る)。それに対して、Soar はスタックとして複数のゴールを配置させることができる。

Soar と ACT-R は、ゴールの階層構造を保持する。階層構造に従い、システムの焦点は、続くサブゴールへと移動していく。ACT-R において、ゴールは系列的に (階層構造における出現順序と逆の順序で) 満たされなければならない。Soar においても、一般的に、ゴールは系列的に満たされる。だが、ゴール階層において、より高次のサブゴールが解決されたとき、それより低次のサブゴールを除去 (解決されたことにする) することができる。この違いは、ACT-R の反応をより遅くさせる可能性がある。現在、ACT-R の反応をより敏感的なものにさせる研究が行われている [Lebiere 01, Salvucci 06]。

§ 3 Soar と ACT-R における差異

Soar と ACT-R には、根本的な差異もある。Soar における状態間の移動は、決定手順の一部を介してなされる。ルールは、決定手順において投票のみを行い、状態変化の直接的な原因にはならない。Soar において、プロダクション (ルール) が発火しないときは、オペレータが選択されるか、状態が修正される。この全体的なプロセスを、決定サイクルと呼ぶ。オペレータを選択することができない (例えば、提案されるオペレータがない) と、続くオペレータを選択するためのサブゴールが生成される。ACT-R の場合、プロダクションの発火は、直

接的に状態,あるいはゴールスタックを変化させる。また,多くのバージョンのACT-Rは,適合するルールがないときに,ただ停止する。

初期のSoarにおける学習は,プロダクション記憶に限定される。サブゴールが解決されたときはいつでも,新たなルールが生成される。したがって,次に同様の状況に直面したとき,新たなプロダクションがサブゴールの生成なしに発火する。新たなルールは,オペレータの選択や生成に関わる情報を含む。生成されるルールは原子的で,完全な学習を直ちに生じさせるものとみなされる。この学習メカニズム(プロダクションチャンキング)は,長期的な宣言的知識の獲得を含む多様な学習効果を実現する。最新のSoar 9はサブシンボリックな学習メカニズムとして強化学習を含む。

ACT-Rの学習は宣言的,手続き的記憶の両方を含む。発火されたルールの強度は高まり,使用された宣言的記憶は強化される。また,潜在的なプロダクションは,それぞれ成功確率,コスト,現在のゴール値に基づく期待値をもつ。複数のプロダクションがマッチしたときは,期待値の最も高いプロダクションが選択される。プロダクションが後続する試行において成功すれば,そのルールが使用される確率が高くなる。

ルール学習メカニズムは,ACT-Rではより低い頻度で使用される。そして,それが用いられるとき,通常は初期の試行でルールが生成され,完全な学習に至るまで,ルールの生成が繰り返される(例えば,[Jones 00, Taatgen 03])。

2.2 CoJACK

CoJACKは,BDIエージェント(後述)における高次知識表現と低次認知アーキテクチャの特性を組み合わせる。組み入れられる低次アーキテクチャの特性は,トレースの容易さ,反応時間の予測,エラーを含む[Evertsz 07]。CoJACKは,ACT-RとSoarの教訓を含めようとしている[Norling 04]。CoJACKはまた,長期的な課題におけるパフォーマンスの多様性など,マクロ認知の重要な側面を含む。その振舞いやパフォーマンスに及ぼす調整器(moderator)の効果が,単純な対戦環境において示されてきた。CoJACKはその他のアーキテクチャへの教訓を提供する。例えば,個人や認知の時間的側面により生じる多様性をどのように決定し,測定し,統制するのかわかる問題,状況への気づきの重要性,状況への気づきに関する知識表現,状況への気づきをほかの認知アーキテクチャに実装することの複雑さに関する教訓である。

§ 1 JACK

CoJACKはJACK(Java Agent Construction Kit[Busetta 99])に基づいている。JACKは,いわゆるBelief-Desires-Intentions(BDI)モデルを使用している。BDIは行為に関する合理的な意思決定を明確化するパラ

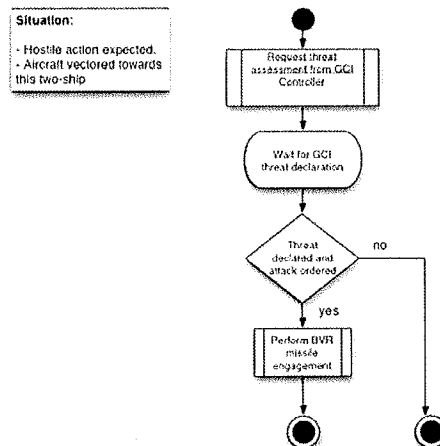


図1 JACK/CoJACKにおける単純なプラン

ダイムである。BDIはプランニングに関する既存のAIアプローチにおける問題の回答として開発された。エージェントは,典型的には,動的な環境におかれ,継続的に自身のゴールと行為を内省する。

JACKの主要なプログラミング要素は,以下のようなものである。

イベント エージェントを動機づける中心的な要因である。外的な刺激や内的な処理の結果に応じて生成される。
プラン イベントに対する反応を決定する手続きである。イベントが生成されたとき,JACKはイベントに適用可能なプランを計算する。エージェントが選択したプランは,次の意図を形成することになる。プランは実行ステップを定義する本体をもつ。プランの選択は非決定的で,エージェントに通常と異なるプランを試みることを許す。

信念集合 宣言的で一階の関係を表現する信念。信念集合は,作業記憶と同様のものである。

意図 現在アクティブなプランのインスタンス(エージェントが関与しているプランのインスタンス)。エージェントがプランにシンボリックな参照を付与し,インスタンス化すると意図が形成される。

JACKは,対象分野の専門家が自身の推論を内省するのと同様の方法で,プランを表現し実行する。図1(ジャックのプランを図的に示したもの)は,モデル構築者がJACKの行動を詳細に検討するとき有用である。また,この図は,戦略の論理構造を視覚化し,専門家との議論において役に立つ。それゆえ,CoJACKの設計では,JACKの高次表現とユーザビリティを受け継ぐことを中心的な目標に据えた。

§ 2 CoJACKによるJACKの拡張(タイミング,エラー,調整器)

CoJACKは,JACKを,調整器レイヤと制約・パラメータの集合によって拡張する。JACKアーキテクチャの主要な活動である信念の追加やプランのインスタンス化

などは、それと関連づけられてパラメータ化された時間コスト (シミュレーション時間) をもつ。

CoJACK は決定プロセスにノイズを加える。ノイズは信念の検索に影響を与える。例えば、適合する信念の検索に失敗することや、部分的にマッチする信念が検索されるなどの効果を実現する。類似したメカニズムは、次に実行される意図の選択にも影響を与える。よって、エージェントは誤った意図を選択したり、意図の検索すら失敗したりする。ノイズによる行動の調整により、CoJACK は、エージェントアーキテクチャとしては、やや普通ではない学習をする。

認知パラメータは、実行時に調整され、体系的な行動の多様化を導く。例えば、カフェイン調整器は、推論ステップの実行に要する時間を減少させ、反応時間の減少を導く。

CoJACK 認知モデルは、三つの課題に用いられてきた。系列的な引き算、交戦規定が行動調整に与える影響、あるいは交戦規定が行動調整から受ける影響のシミュレーション [Evertsz 07]、非常に単純な戦車課題をプレイすることである [Evertsz 08]。

3. 感情のモデル

認知科学と認知モデリングにおいて、感情をもち、感情を理解するモデルを構築することの関心は高まりつつある。これらのモデルは、感情の有用な定義、感情とは何かを探索する手法、感情がどのように認知やパフォーマンスと関わり、影響するのかを探る手段を提供する。

ここで、認知アーキテクチャの中で感情を生成する二つの方法を記す (これらはその他複数の中から選ばれたものである [Ritter 93])。これらは、アーキテクチャのパラメータを修正することにより生成され (オーバーレイ)、感情をアーキテクチャに直接的に組み入れることで生成される (ドライブ)。

3.1 オーバレイ

パラメータの変化として感情やほかの行動調整器を表現することは、認知アーキテクチャに、その影響を組み入れる直接的な手段である。複数のパラメータを含むアーキテクチャは、変化の表現が容易となる。

§1 Soar

Soar に感情を組み入れる複数の試みがある (例えば, [Chong 88, Marinier 07])。最も大きな試みは、動因理論 [Gratch 04] を導入することである。この試みは、感情理論をアーキテクチャに組み込む方法を示す良い事例である。

Gratch と Marsella は、感情をもつモデルを生成するためには、情報の補足的なタイプが必要となることを発見した。彼らは、感情内容が相互作用の生起に有用であることを発見した (例えば, 「何があったの?」という問いに答えるためには、状況の感情的側面を知らなければ

ならない)。彼らは、動因プロセス・行動・エージェントの生理が相互作用することを発見した。この相互作用は、それ以前にも知られていた。しかし、彼らの研究は、実行可能なモデルによって、より興味深いものとなっている。この相互作用のモデリングは、とても興味深い問題を残している。

§2 ACT-R

ACT-R は、感情のオーバーレイや感情と関連する行動の調整器を構築するために、数多く用いられてきた。これらは、認知発達の効果 [Jones 00]、疲労 [Jongman 98]、ストレス [Belavkin 00]、覚醒 [Cochran 06]、睡眠不足 [Gunzelmann in press]、ストレス [Ritter 07] を表現するオーバーレイを含む。

典型的には、これらは既存のアーキテクチャがもつ少数のパラメータを修正する。少数の事例において、これらはルール選択や宣言的記憶の検索に関わる等式を修正する。

このアプローチは段階的なものではあるが、感情と行動調整を形式的に表現する理論の構築手段となる。結果として生み出される理論は、疲労によって運転がどのように影響されるのかを予測する運転のモデルなど、ほかのモデルとともに動作するだろう。

§3 CoJACK

CoJACK は ACT-R における等式のほぼすべてを、BDI 構成概念の使用を調整するために用いる。図 2 はどのようにしてオーバーレイが JACK, CoJACK と相互作用するのかを示す。オーバーレイは、作業記憶の限界やアクセス速度、処理速度、決定プロセスにおけるノイズのような変化を表現するためにパラメータを修正する。これらのオーバーレイはストレスやカフェインによる影響 (投稿中)、恐怖などを含む [Evertsz 07]。

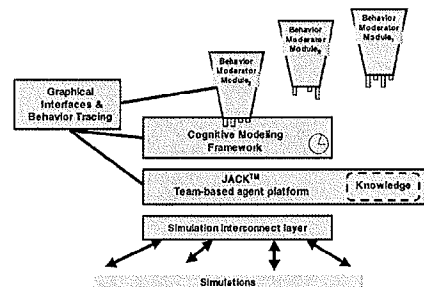


図2 JACK/CoJACK と調整器の関係

§4 まとめ

オーバーレイはこれらのアーキテクチャのそれぞれにおいて生成されてきた。これらのオーバーレイは、理論の広い範囲を実装するために用いられ、多くの感情と調整器がこのような手法で探索可能なものであることを示唆する。

これらのオーバーレイは、アーキテクチャの要素を表現するのと同様の方法 [Gray 07] で分類できる。つまり、(ローカルな) パラメータの変化、アーキテクチャの要素に

における変化, ストラテジーや知識表現の変化に関するオーバーレイである。

これらのオーバーレイはいくつかの興味深い疑問を提起する。例えば、ACT-Rにおける睡眠の遮断をモデリングする研究 [Gunzelmann in press] は、どのようにして課題間、母集団間をまたぐ結果の一般化が行われるのかについて疑問を提起する。カフェインの効果をモデリングするためには、追加的なデータが必要である。カフェインを摂取した人が、素早くなることは確かだが、どのように速度の向上をメカニズム間で割り当てればよいのだろうか。

初期の研究は、相対的に単純で静的なオーバーレイを用いるところから始まった。やがて、オーバーレイは認知と感情の相互作用、行動調整器によるストラテジー選択への影響をモデル化するより動的なシステムを表現するようになるだろう。これは転じて、より大きな変化を認知にもたらすだろう。

ほかのアーキテクチャを用いた類似した研究も可能である。EPIC[Kieras 97], Clarion[Sun 06b], R-CAST[Fan 07], そしてGOMS[Kieras 98]ですら類似したオーバーレイを実装することは容易である。

3.2 PSI とほかのドライブをもつシステム

Dietrich Dörnerは、PSI アーキテクチャを提案した(例えば, [Dörner 03])。このアーキテクチャは、多くの認知メカニズムと相互作用するドライブを導入する。ドライブは、どのように感情が生起し、アーキテクチャの動作を根本的に変化させるのかを明らかにする。また、ドライブはシミュレーション世界で自律的に行動するアーキテクチャを提供する。

PSI は、生理的(空腹など)、社会的(親和ニーズなど)、認知的(不確実性の低減など)という3種類のドライブを導入する。これらのドライブは、すべてのゴールの形成と知識の選択・適用に影響を与える。結果としてのアーキテクチャは、新たな行動の種類を生成する。例えば、状況依存の記憶、社会的に動機づけられた行動、内的に動機づけられた課題変更などである。Joscha Bachは、最近、この理論をMicroPSI アーキテクチャとして実装した[Bach 09]。

これまで、このアーキテクチャの人間のデータに対する予測が検討されてきた。しかし、PSI モデルは、一般的に妥当な認知モデルというより、行動生成に関するアーキテクチャの理論的な探求として捉えられている。であるからこそ、このアーキテクチャの扱う範囲はより大きなものになり得る。認知の統合理論を目指す新たな認知アーキテクチャを示しているといえる。

§1 まとめとさらなる課題

PSI, そしてそれと類似した感情を直接的に取り入れるシステム(PMServe[Silverman 04], Clarion[Sun 06a], MAMID[Hudlicka 02])は、ほかのアーキテクチャ

とモデルに対して、いくつかの教訓を与える。これらは、ドライブと関連したメカニズムが存在し、それが人間行動の重要な側面であることを示唆する。単純なシステムにとって、これらを導入しないことは問題にはならない。しかし、より広範で長期の行動をモデル化しようとすれば、ドライブはより重要になるだろう。単純なオーバーレイでは、いずれ効果を広げることではなくなる。

やがて、モデルは感情の認知に及ぼす効果、睡眠不足のような行動調整器を組み入れるようになるだろう。これらはほとんどの実験的方法が除去しようとしていたものである。アーキテクチャは、オーバーレイを介した単純な情報処理の変化を必要とするだろう。これらは、また長期的なゴールや欲求を表現するドライブを含むようになるだろう。

行動調整器を含めることは、応用にとって重要である。なぜなら、我々は理想的な行動ではなく、実際の行動を予測したいからである。多くのユーザが覚醒している一方で、全員がそうというわけでもない。正しくないことをするモデルをもつことは、シミュレーションにとって重要である。モデルは、ミスを利用しようとする対戦相手や、ミスを支援しようとする仲間を表すようになる。

このような効果を取り入れることは理論的な理由から重要である。これらは、理論の体系化を支援し、より正確な予測の生成を促すだろう。

最終的には、このアプローチは、疲労や神経伝達などの生理メカニズムをもつ模擬的な身体構築を必要とするだろう。身体化された認知の進展に伴い、生命科学との統合の方法が提案されるだろう。それが起きる前に、どのように特定の調整期が複数の課題における認知に影響するのかに関する要約が必要になる。この要約には、時間を要するだろう。しかし、アーキテクチャのオーバーレイをつくるためには、価値のあることである。

4. モデルのユーザビリティ

感情効果のモデルは、長期的な行動を実現する知識集合と、選択されるべきストラテジーを表現する大きなモデルを必要とする。認知モデルの構築と使用が必ずしも容易なことではないと少数の機会で記してきた[Pew 98, Pew 07, Ritter 03b]。少なくとも私達が望んでいるほど、その利用は容易ではない。そして、理論が難解で適用できないとき、それは工学的問題とみなされるだろう。

著者は、認知科学工学という用語を導入したい。これは認知科学をどのように構成し適用するのかを研究する新たな分野である(認知工学という言葉は、すでに用いられているため用いない)。心理学が心理学のツールを心理学と呼ぶことを拒否するのと同様、認知科学は、モデルの工学を認知科学と呼ぶことを拒否する傾向にある(物理と化学のためのツールは、物理と化学であるのにもかかわらず)。

最初で最も重要な認知科学工学は、モデルのユーザビリティ、または大きなモデルを構成し、理解する能力に

関わることといえる。その他の認知科学工学の例は、先行するレビューで示した [Ritter 03b]。データとモデルの適合を最適化すること [Kase 08]、モデルをシミュレーションへ結びつけることなどである [Byrne 01, Ohno 99, Ritter 00]。後者では、モデルを、模擬的な世界、あるいは現実世界と、もっともらしく適切に結合させるために工学と科学が相互作用する。これらは、認知科学の科学における直接的な問題にはならない。しかし、これらの問題は、特定方向への認知科学の進歩を停滞させる。

モデルのユーザビリティは、三つのアーキテクチャによって、異なる形で述べられ、それぞれに対する、あるいはほかのアーキテクチャに対する教訓が提供されてきた。

4.1 Soar

Soar のプログラミングインタフェースを提供しようとするいくつかの試みがある。Developmental Soar Interface (DSI) は、最初のものであった (例えば, [Ritter 94])。それ以降、いくつかのコンソールベースのインタフェースが開発されてきた (例えば, [Ritter 98])。最新バージョンの Soar は、このレベルにおいて、とても良いインタフェースを備える。

より最近では、構造化ルールエディタが提供された (例えば, Visual Soar)。これらは、より洗練され、複雑化しつつある。ルールをオペレータの部品として組織化し、オペレータ間での構造のデータマップを提供するようになってきた。これらのツールは、比較的、低次のプログラミングを支援する。しかし、時間とともにより高次の支援につながるだろう。

さらに二つのアプローチが、Soar 用の高次言語を提案しようとしている。一つの Soar 用の高次言語は、TAQL [Yost 93] である。少数の研究が、この言語は Soar におけるモデル構築を 3 倍速くさせると報告した。HLSR は、Soar と ACT-R のための高次言語を提供しようとするより最近の試みである [Jones 06]。

もう一つの試みは、Herbal である [Haynes 09]。これは、Soar と Jess に組み入れるための言語であり、問題空間と計算モデル (PSCM [Newell 90]) の一つの実装である。この言語は 100 名以上に用いられてきた。我々の現在の最も良い評価では、この言語の使用により、心理学専攻の大学生は、計算機科学専攻の大学院生の 3 倍の速度で小さな認知モデルの構築が可能になるとされる。

4.2 ACT-R

ACT-R は、現在、良いルールレベルのインタフェースをもつものの、一般的な高次言語はもたない。しかしながら、単純な ACT-R モデルをより素速くつくる方法を検討するいくつかのプロジェクトがある [Ritter 06]。これらには、ACT-Simple (単純なモデルを構築する言語)、G2A (GOMS モデルから ACT-R モデルをつくる言語)、CogTool (視覚的な記述やメニューとの相互作用から単

純なモデルを自動的につくる言語) のような特別の目的の言語が含まれる。

ACT-R は、モデルをまたぐ再利用を可能とし、理論の範囲を増大させている。これらは、一般的な言語を提供せずに、モデルの構築を支援する。さらに、どのようにしてモデルが再利用され、モジュールベースの高次言語を提供するのかに関する教訓を導くかもしれない。

4.3 CoJACK

CoJACK は、[Shakir 02] によるレビューに部分的に基づいて構成された。このレビューでは、Soar に比べて JACK はインタフェースの構成が容易であり、認知的なモデルの構成をより容易にするとされる。このレポートには、限定された研究者の集団のみがサンプルとされているなどの点で不備がある。しかしながら、ユーザビリティの方向性については支持されてきた。著者が CoJACK について研究をしてきた何年かにおいて、Java を知っているユーザは CoJACK のユーザビリティについて不満を述べなかった。

CoJACK が使いやすいこと (あるいは使いやすいように見えること) には、いくつかの理由がある。CoJACK が継承する高次 BDI 構成概念は、プログラマや専門家に親しみのある素朴心理学の概念を用いており、用いることが容易なものである。我々が未だに探求を続けている問題は、これら (BDI 構成概念) が、人々が行動を生成するために内的に用いる構成概念であるのかということである。だが、もしそれらが異なっていたとしても、いずれ、BDI 構成概念は、認知科学的構成概念として翻訳 (解釈) されることになるだろう。また、広い意味で理解の容易なインタフェースは、注意深くデザインされ、構築されたものであった。最後に、Java と CoJACK の構成概念は、複雑なものであり、えり抜きのプログラマのみが用いてきた (プログラマの知恵が、使いやすく見せているのかかもしれない)。

CoJACK の次のステップは、より大きく、より複雑なモデルのためのインタフェースを用いることである。そして、それを検証しなければならない。そのことにより、アーキテクチャが使いやすいものであることの真の証明が導かれる。

4.4 今後の課題

より多くの知識を組み入れた大きなモデルを構築することは必要なことである。これはすべてのアーキテクチャにとって必要なことだろう。特に、感情によるストラテジー選択やパフォーマンス変化への影響をモデリングするときに、この問題は当てはまる。これらのアーキテクチャのすべては高次言語を用意することに向かっている。最近のレビュー [Ritter 06] では、複数のグループがこの分野で研究をしていることを指摘している。このような研究は来るべきときに重要になるだろう。

5. お わ り に

この短いレビューで、いくつかのハイブリッド認知アーキテクチャについて記述してきた。サブシンボリックな表現に向けたアーキテクチャの拡張は、より正確なタイミングの予測（特にパフォーマンスに多様性を含める）、エラー（記号的プロセスによる知識適用が、より不正確になる）、基本的なプロセスが不正確になる場面で調整器を導入する能力を提供するだろう。

また、この論文は認知科学工学を導入した、認知科学システムの工学である。ソフトウェアとしての認知理論のさまざまな側面を構成することは、時間と労力を要する。このラベルをつくることで、このタイプの研究を記述する方法が提供されるだろう。そして、実践者を互に見つけることを支援するだろう。また、問題とその解決策が見いだされたとき、それを共有する方法を提供するだろう。

ここで示した研究を進展させるために、それほど多くの技術を必要としないことを指摘しておくことには意味がある。多くの研究は、ストップウォッチ、音声やビデオの記録、通常の計算機によって達成される。しかし、最先端の計算環境などを利用することが可能であれば、それを活用することはできる。それゆえ、研究設備を準備することはできる。

このレビューは、感情のモデリングに関するいくつかの興味深い問題を記してきた。これらのプロジェクトは、どのようにして認知の計算機モデルが、統合された心理学において用いられるようになるか、あるいは人間行動のより正確な予測に用いられるようになるかを示す事例である。認知モデルを他分野の人間行動に適用しようとすると、類似したプロジェクトが可能となる。例えば、これらは心理学と社会科学の素晴らしい協調の方法を提供する。そしてまた、仮想的な世界における応用、あるいはインタフェースデザインへの応用の方法を提供する。

これらの研究課題は、ここで議論したアーキテクチャに特別なものではない。同様の問題は、一般的であり、ほかのアーキテクチャにおいても生じるだろう。よって、これらは我々を常に忙しくし、そして、多くの研究者によって取り組まれるものである。我々はこの分野における研究を始めたばかりであり、研究のアジェンダは適切な規模である。研究のアジェンダが大きすぎると、これは全く適切なものではなくなる。

謝 辞

米国海軍研究局 (N00014-03-1-0248, N00014-06-1-0164)、英国国防省、分析・実験・シミュレーション法人研究プログラム (Project No: RT/COM/3/006) による支援を受けた。Olivier Georgeon 氏、三輪和久氏、Colin Sheppard 氏による有益なコメントを受けた。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Anderson 73] Anderson, J. R. and Bower, G. H.: *Human Associative Memory*, Hillsdale: Erlbaum (1973)
- [Anderson 83] Anderson, J. R.: *The Architecture of Cognition*, Cambridge, MA: Harvard University Press (1983)
- [Anderson 07] Anderson, J. R.: *How Can the Human Mind Exist in the Physical Universe?*, New York, NY: Oxford University Press (2007)
- [Bach 09] Bach, J.: *Principles of Synthetic Intelligence: Building Blocks for an Architecture of Motivated Cognition*, New York, NY: Oxford University Press (2009)
- [Belavkin 00] Belavkin, R. and Ritter, F. E.: Adding a theory of motivation to ACT-R, *Proc. 7th Annual ACT-R Workshop*, pp. 133-139, Pittsburgh, PA: Department of Psychology, CMU (2000)
- [Busetta 99] Busetta, P., Ronnquist, R., Hodgson, A. and Lu-cas, A.: JACK intelligent agents — Components for intelligent agents in JAVA, *AgentLink News Letter*, Vol. 2 (Jan. 1999), www.agent-software.com/white-paper.pdf
- [Byrne 01] Byrne, M. D.: ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI, *Int. J. Human-Computer Studies*, Vol. 55, No. 1, pp. 41-84 (2001)
- [Chong 88] Chong, R. S.: Modeling dual-task performance improvement: Casting executive process knowledge acquisition as strategy refinement, PhD thesis, Unpublished PhD thesis. CSE-TR-378-98, The University of Michigan (1988)
- [Chong 01] Chong, R. S.: Low-level behavioral modeling and the HLA: An EPIC-Soar model of an enroute airtraffic control task, *Proc. 10th Computer Generated Forces and Behavioral Representation Conference*, pp. 27-35, Orlando, FL, Division of Continuing Education, University of Central Florida (2001)
- [Cochran 06] Cochran, L. F. J., R. E. and Chown, E.: Modeling emotion: Arousal's impact on memory, *Proc. 28th Annual Conf. of the Cognitive Science Society*, pp. 1133-1138, Erlbaum: Mahwah, NJ (2006)
- [Dörner 03] Dörner, D.: The mathematics of emotions, *Proc. 5th Int. Conf. on Cognitive Modelling*, pp. 75-80, Bamberg, Germany, Universitäts-Verlag Bamberg (2003)
- [Evertsz 07] Evertsz, R., Ritter, F. E., Russell, S. and Shepherdson, D.: Modeling rules of engagement in computer generated forces, *Proc. 16th Conf. on Behavior Representation in Modeling and Simulation*, Vol. 07-BRIMS-021, Norfolk, VA, U. of Central Florida (2007)
- [Evertsz 08] Evertsz, R., Busetta, P., Pedrotti, M., Ritter, F. E. and Bittner, J. L.: CoJACK-Achieving principled behaviour variation in a moderated cognitive architecture, *Proc. 17th Conf. on Behavior Representation in Modeling and Simulation*, Vol. 08-BRIMS-025, pp. 80-89, Orlando, FL, U. of Central Florida (2008)
- [Fan 07] Fan, X. and Yen, J.: R-CAST: Integrating team intelligence for human-centered teamwork, *Proc. 22nd AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-07)* (2007)
- [Gratch 04] Gratch, J. and Marsella, S.: A domain-independent framework for modeling emotion, *J. Cognitive Systems Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 269-306 (2004)
- [Gray 07] Gray, W. D.: Composition and control of integrated cognitive systems, in Gray, W. D. ed., *Integrated Models of Cognitive Systems*, pp. 3-12, Oxford University Press, New York, NY (2007)
- [Gunzelmann in press] Gunzelmann, G., Gross, J. B., Gluck, K. A. and Dinges, D. F.: Sleep deprivation and sustained attention performance: Integrating mathematical and cognitive modeling, *Cognitive Science* (in press)
- [Haynes 09] Haynes, S. R., Cohen, M. A. and Ritter, F. E.: A design for explaining intelligent agents, *Int. J. of Human-Computer Studies*, Vol. 67, No. 1, pp. 99-110 (2009)
- [Hudlicka 02] Hudlicka, E. and Pfautz, J.: Architecture and

- representation requirements for modeling effects of behavior moderators, *Proc. 11th Conf. on Computer Generated Forces and Behavioral Representation*, Vol. 02-CGF-085, pp. 9-20, Orlando, FL, Division of Continuing Education, University of Central Florida (2002)
- [Johnson 98] Johnson, T. R.: A comparison of ACT-R and Soar, in Schmid, U., Krems, J. and Wysotzki, F. eds., *Mind Modeling — A Cognitive Science Approach to Reasoning, Learning and Discovery*, pp. 17-38, Pabst Scientific Publishing, Lengerich, Germany (1998)
- [Jones 00] Jones, G., Ritter, F. E. and Wood, D. J.: Using a cognitive architecture to examine what develops, *Psychological Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 93-100 (2000)
- [Jones 06] Jones, R. M., Crossman, J. A. L., Lebiere, C. and Best, B. J.: An abstract language for cognitive modeling, *Proc. 7th Int. Conf. on Cognitive Modeling*, pp. 160-165, Mahwah, NJ, Erlbaum (2006)
- [Jongman 98] Jongman, G. M. G.: How to fatigue ACT-R?, *Proc. 2nd European Conference on Cognitive Modelling*, pp. 52-57, Nottingham, Nottingham University Press (1998)
- [Kandel 92] Kandel, A. and Langholz, G.: *Hybrid Architectures for Intelligent Systems*, CRC Press, Boca Raton, FL (1992)
- [Kase 08] Kase, S. E.: HPC and PGA optimization of a cognitive model: Investigating performance on a math stressor task, PhD thesis, College of IST, Penn. State University, University Park, PA (2008)
- [Kennedy 06] Kennedy, W. G. and Trafton, J. G.: Longterm learning in Soar and ACT-R, *Proc. 7th Int. Conf. on Cognitive Modeling*, pp. 162-168, Trieste, Italy, Edizioni Goliardiche (2006)
- [Kieras 98] Kieras, D. E.: A guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL, in Helander, M. ed., *Handbook of Human-Computer Interaction*, Vol. 12, pp. 391-438, Elsevier, Amsterdam (1998)
- [Kieras 97] Kieras, D. E., Wood, S. D. and Meyer, D. E.: Predictive engineering models based on the EPIC architecture for a multimodal high-performance human-computer interaction task, *Trans. on Computer-Human Interaction*, Vol. 4, No. 3, pp. 230-275 (1997)
- [Laird 08] Laird, J. E.: *Extending the Soar Cognitive Architecture, in Artificial General Intelligence Conference*, Memphis, TN (2008)
- [Lebiere 01] Lebiere, C.: Multi-tasking and cognitive workload in an ACT-R model of a simplified air traffic control task, *Proc. 10th Computer Generated Forces and Behavioral Representation Conference*, pp. 91-98, Orlando, FL, Division of Continuing Education, University of Central Florida (2001)
- [Marinier 07] Marinier, R. P. and Laird, J. E.: Computational modeling of mood and feeling from emotion, *Proc. 29th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Austin, TX, Cognitive Science Society (2007)
- [Newell 90] Newell, A.: *Unified Theories of Cognition*, Harvard University Press, Cambridge, MA (1990)
- [Norling 04] Norling, E. and Ritter, F. E.: *COJACK Software Specification*, Agent Oriented Software Limited (2004)
- [Ohno 99] Ohno, T. and Ogasawara, H.: Information acquisition model of highly interactive tasks, *Proc. ICCS/JCSS-99 Waseda University*, Japanese Cognitive Science Society (1999)
- [Pew 98] Pew, R. W. and Mavor, A. S.: *Modeling Human and Organizational Behavior: Application to Military Simulations*, National Academy Press, Washington, DC (1998), books.nap.edu/catalog/6173.html
- [Pew 07] Pew, R. W. and Mavor, A. S., eds.: *Human-System Integration in the System Development Process: A New Look*, National Academy Press (2007)
- [Ritter 93] Ritter, F. E.: Three types of emotional effects that will occur in cognitive architectures, *Workshop on Architectures Underlying Motivation and Emotion (WAUME93)*, School of Computer Science and Centre for Research in Cognitive Science, University of Birmingham, UK (1993)
- [Ritter 94] Ritter, F. E. and Larkin, J. H.: Developing process models as summaries of HCI action sequences, *Human-Computer Interaction*, Vol. 9, No. 3, pp. 345-383 (1994)
- [Ritter 98] Ritter, F. E., Jones, R. M. and Baxter, G. D.: Reusable models and graphical interfaces: Realising the potential of a unified theory of cognition, Schmid, U., Krems, J. and Wysotzki, F. eds., *Mind modeling — A Cognitive Science Approach to Reasoning, Learning and Discovery*, pp. 83-109, Pabst Scientific, Lengerich, Germany (1998)
- [Ritter 00] Ritter, F. E., Baxter, G. D., Jones, G., and Young, R. M.: Supporting cognitive models as users, *ACM Trans. on Computer-Human Interaction*, Vol. 7, No. 2, pp. 141-173 (2000)
- [Ritter 03a] Ritter, F. E.: Soar, in Nadel, L. ed., *Encyclopedia of Cognitive Science*, Vol. 4, pp. 60-65, Nature Publishing Group, London (2003)
- [Ritter 03b] Ritter, F. E., Shadbolt, N. R., Elliman, D., Young, R. M., Gobet, F. and Baxter, G. D.: *Techniques for Modeling Human Performance Synthetic Environments: A Supplementary Review*, Human Systems Information Analysis Center (HSIAC), Wright-Patterson Air Force Base, OH (2003)
- [Ritter 06] Ritter, F. E., Haynes, S. R., Cohen, M., Howes, A., John, B. and Best, B.: High-level behavior representation languages revisited, *Proc. ICCM-2006 — 7th Int. Conf. on Cognitive Modeling*, pp. 404-407, Trieste, Italy, Edizioni Goliardiche (2006)
- [Ritter 07] Ritter, F. E., Reifers, A. L., Schoelles, M., and Klein, L. C.: Lessons from defining theories of stress for architectures, in Gray, W. ed., *Integrated Models of Cognitive Systems*, pp. 254-262, Oxford University Press, New York, NY (2007)
- [Salvucci 06] Salvucci, D. D.: Modeling driver behavior in a cognitive architecture, *Human Factors*, Vol. 48, pp. 362-380 (2006)
- [Shakir 02] Shakir, A.: Assessment of models of human decision-making for air combat analysis, Technical report, Abstract, put on the web with permission, at <http://acs.ist.psu.edu/papers/shakir02-abstract.pdf> (2002)
- [Silverman 04] Silverman, B. G.: Human performance simulation, in Ness, J. W., Ritzer, D. R. and Tepe, V., eds., *The Science and Simulation of Human Performance*, pp. 469-498, Elsevier, Amsterdam (2004)
- [Sun 94] Sun, R. and Bookman, L. A., eds.: *Computational Architectures Integrating Neural and Symbolic Processes: A Perspective on the State of the Art*, Kluwer, Norwell, MA (1994)
- [Sun 06a] Sun, R.: The Clarion cognitive architecture: Extending cognitive modeling to social simulation, in Sun, R. ed., *Cognition and Multi-agent Interaction*, Cambridge University Press, New York (2006)
- [Sun 06b] Sun, R. and Zhang, X.: Accounting for a variety of reasoning data within a cognitive architecture, *J. Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 18, No. 2, pp. 169-191 (2006)
- [Taatgen 03] Taatgen, N. A. and Lee, F. J.: Production compilation: A simple mechanism to model complex skill acquisition, *Human Factors*, Vol. 45, No. 1, pp. 61-76 (2003)
- [Touretzky 86] Touretzky, D. S.: A distributed connectionist production system, Technical Report, CMU-CS-86-172, Computer Science Department, CMU (1986)
- [Yost 93] Yost, G. R.: Acquiring knowledge in Soar, *IEEE Expert*, Vol. 8, No. 3, pp. 26-34 (1993)

2009 年 1 月 5 日 受理

著者紹介

Frank Ritter

Frank Ritter は、認知モデルの開発、応用、方法論に関する研究を行っている。その研究は、特に、学習の理解、行動調整器の効果の予測、インタフェースデザインのための認知モデルの応用に向けられている。現在、認知モデルと認知アーキテクチャに関するオックスフォード大学の出版物の編集に携わっている。