

8. What Role Do Cognitive Architectures Play in Intelligent Tutoring Systems?

John R. Anderson and Kevin A. Gluck (Carnegie Mellon University)

Cognition and Instruction Chapter 8

はじめに

■ 認知心理学の役割

Bruer(1998) : ”認知心理学は脳に関する研究と教育に関する研究を結ぶ島としての役割”

この章で扱う問題 : 基礎的な認知心理学から教育へどのような方法で橋渡しができるか?

認知心理学と教育の架け橋 : 単純なタスクと教室で発生するより複雑な認知の架け橋となる.

■ 統合的な認知

認知の統合的な説明は教育的な応用のためにはきわめて重要 : **Newell(1973)**

Cognitive Architectures : 様々な認知システムを統合し, 複雑な認知を実現

章の概要 : **ACT** アーキテクチャの教育への応用に関する議論

THE ACT THEORY AND COGNITIVE TUTORS

■ ACT 理論の基礎概念

人間の認知に関する前提 : 手続き的記憶と宣言的記憶のインタラクションをとおして現れる.

手続き的/宣言的の区別 : 認知神経科学においても類似の知見

手続き的学習は大腦基底核と関連し, 宣言的学習は海馬と関連

宣言的学習 : **3+4=7** のような様々な事実の獲得

手続き的学習 : 問題を解決するための情報を検索するプロダクションルールの獲得

ACT 理論 : 認知をプロダクションルールの発火の系列として表現

■ Cognitive Tutor のデザイン

モデルによって生徒の振る舞いを解釈

・ 生徒はコンピュータを使って問題を解決 (プログラミングのエディタなど)

・ モデルトレーシングによって生徒の振る舞いを導出するプロダクション系列を見つける.

生徒の行動の解釈 : 指導のインタラクションを **3** つの方法で統制する.

1. 生徒が助けを必要としたら, 彼らの問題解決プロセスに合わせて適切な支援を与える.
2. 生徒が進行に合わせてモデルを更新し, カリキュラム全体をとおして生徒を支援する.
3. 生徒が特定可能なエラーをしていると判断したら, 介入して適切に支援することができる.

VALIDITY OF THE APPROACH

アプローチの有効性の評価 : 教育的な成果, チューターで作業した生徒の行動の分析

Achievement Gains.

■ 実用的な評価

・ チューターを使用した生徒 : 使用しなかった生徒よりも授業の成績が約 **1** 段階良かった.

- ・生徒のやる気を高め、多くの教師の支持を受けた。
- ・300の学校で使用され、50,000人の生徒を教えた。

■学力増幅率

Figure8.1 : 問題解決スキルと数学的関係の利用の教授を対象とした **PAT Algebra 1** の評価

- ・統制群に比べて対象となったスキルは非常にポジティブな効果
- ・対象ではない伝統的な幾何学のパフォーマンスにもわずかにポジティブな効果

エフェクトサイズ:チューターを使用した生徒の成績の分布が統制群から1標準偏差分上に推移

Figure8.1 : パフォーマンス軸の目盛り (最大でも5割) が低い

改善すべき部分がまだ残されていることは明らかである。

Analysis of Tutor Interactions.

■能力の考え方

チューターの主要な前提

領域の能力を複数の構成要素に分解し、スキルの学習を個々の構成要素の学習と捉える。

反対の考え方: 急進的な構成主義の教育者によって提案された教育プログラム

能力を構成要素に分解することができず、どのような試みも不成功に終わった。

■知識の分解の問題に関する直接的な証拠

Figure8.2 : **Lisp tutor** 使用時の生徒のデータとモデルの予測データ

Actual Error Rate : 教材中の各関数の学習の各ポイントでの生徒のエラー率

Predicted Error Rate : モデルが予測したエラー率

プロダクションルールの獲得: 各ルールに学習曲線があり、複数の適用を経て学習される。

Figure8.3 : プロダクションルールの適用回数とエラー率

Expected error rate : システムが想定した学習曲線

Figure8.2 の上昇と落下: 異なるポイントでの新しいプロダクションルールの学習を意味する。

複雑な行動をモデルベースで説明できる事実: 知識の分解の問題を支持する証拠

LISP tutor の初期のルール集合: 規則正しい学習データを産出できなかった。

改善を繰り返した結果、最終的なルール集合が作成された。

正しいプロダクションルールが同定されたかどうかの尺度

モデルが実際の **systematic** な学習曲線を正しく予測できる能力

THE GRAIN SIZE OF COGNITION

■粒度の大きさ

Cognitive Tutor : 粒度が大きいため、学習の規則性を捕らえるのに失敗する。

ACT-R 研究所の研究: 認知の **subsecond** ユニットへの分解をサポート

Lee and Anderson(in press) : 航空交通管制の課題のシミュレーション

タスクは複数のユニットタスクへ、さらにユニットタスクは単純な活動へと分解できる。

単純な活動: 視覚的な注意の動きと個々のキーストローク

より時間的に細かい分解能へ向かう傾向: **ACT, Soar, EPIC, CAPS** に共通

認知的なアーキテクチャを人間の認知に関する詳細なデータに対応させるための試み

■ 認知心理学と教育の間のギャップ

認知心理学者：複雑な課題は非常に混濁としていて **systematic** な分析ができない。

認知神経科学：含まれる神経領域が多すぎて、解体するのが困難になることを懸念している。

多くの教育者：数分しか掛からない問題を重視する考え方を非難

複雑な課題に対する考え方の違い：認知心理学と教育の結合に失敗を引き起こしている。

⇒**Cognitive Tutor** の研究：この考えが間違いであることを証明してきた。

■ 認知心理学と教育を結ぶ方法

解決策：神経科学から教育へのパスに沿った島を導入すること

(a) 神経科学から基礎認知科学への橋：心理学的な意味に神経系の詳細を統合

(b) 基礎的な認知から複雑な課題への橋：教育的な意味に心理的なユニットを統合

(c) 課題レベルから教育への橋：重要な知的能力をどのように構成する方法を示す。

THE ACT-R THEORY

■ ACT-R の概要

Figure8.4 : ACT-R の制御構造

認知：現在のゴールと現在のゴールに対応するプロダクションによって制御される。

プロダクション：現実世界に対する行為や宣言的記憶への検索要求を引き起こす。

外部世界での行為：外部世界の情報検索に影響する注意の推移を含む。

検索された情報：ゴールを変化させ、サイクルを進展させる。

プロダクションの発火、検索、ゴール修正のサイクル：数 **100ms** 以下

基礎認知心理学の分析の焦点となる認知のループに影響する。

学習のループ：知識構造を修正するループ

ゴールが達成されたとき新しいチャンクが宣言的記憶に追加される。

プロダクションルール

- ・ ゴール状態を変える関数 **pop** や **push** を呼び出せる。
- ・ 新しいプロダクションルールは宣言的な記憶の過去の解の表象から形成される。

■ 神経プロセスとの融合

Cognitive Architecture : 内在する神経プロセスを反映

神経科学における知見

Wise et. al.(1996) : 大脳基底核は皮質の活性化を受けパターンを認識し前頭葉に送る。

⇒手続き的記憶は大脳基底核と前頭葉で行われている。

海馬：宣言的記憶の生成に主要な役割を持つ。

前頭葉：意図の管理を行う。(ACT-R ではゴールスタックとして実装されている。)

■ ACT-R/PM

Byrne & Anderson(1998) : ACT-R の拡張モデル **ACT-R/PM** を開発

Figure8.5 : ACT-R/PM の概要

ACT-R の全ては認知レイヤーに埋め込まれている。

知覚レイヤー：手の動き，発話，視覚的な注意，聴覚的な注意を独立に制御するモジュール

各モジュール：認知レイヤーや他のモジュールと並列で動く。

HIGH-DENSITY SENSING

■細かい粒度の情報

時間的に高い密度での行動のモニタリング：生徒の認知に関する予測の感度が増加する可能性

人間のチューター：コンピュータよりも細かい粒度で生徒の行動にアクセスできる。

- ・生徒の顔や発話から不満や理解の状態を認識できる。
- ・生徒が問題の解決にどのくらい時間を費やしているかに気づく事ができる。

顔の表情や発話：困惑や理解の指標

発話と同じ情報はタイプできるが，生徒にとってはタイプよりも話すほうが簡単

■技術の進歩と問題

音声認識ソフトや表情の認識，眼球運動の測定技術の発展

Mostow(1998)：音声認識ソフトを使用して生徒の読みをモニター・指導

Salvucci(1999)：リアルタイムに生徒の眼球運動を解析

⇒コンピュータのチューターも，人のチューターのように知覚的に生徒にアクセスできる。

生徒に知覚レベルでアクセスすること：3つの問題が発生

- ・プライバシーと立ち入りすぎること
- ・教育の可能性：時間的に高密度なアクセスによってどのような教育ができるのか？
- ・認知と技術的な問題：時間的に高密度な情報を認知的に解釈する方法

PRIVACY AND INTRUSIVENESS

■プライバシー

高密度な情報の記録に対する人々の認識：人々の2種類の感情の間にある

- ・コンピュータに我々が何をしているのかに対して敏感になって欲しい。
- ・我々が何をしているのかを公開されたくない。

Cognitive Tutorにおける記録：生の詳細な情報は残さない。

生徒がどの程度できているか，どの問題を解いたのかに関する要約を保存

高密度の情報の導入：生徒の記録の程度は変わらない。

⇒記録が認知的な診断の精度に反映される程度だけが異なる。

■intrusiveness(立ち入ること)

Cognitive tutor に対する生徒のポジティブなコメント：人間のチューターよりも気楽にできる。

高密度のチューター：人の場合と同じくらいのインタラクションが可能

高密度の検出機能：立ち入り過ぎる可能性がある。

対処方法：高密度の検出をオフにする機能をつける。

INSTRUCTIONAL OPPORTUNITIES

■眼球運動の指標

眼球運動の情報による教育の可能性に関する検討：PAT algebra tutor での調査

PAT algebra tutor：9年生の幾何学が対象

数学的な関数と様々な表象との関係を教える **Cognitive tutor**：最も広く使われている。

眼球運動の測定性能を上げるために画面のサイズや教材の配置を調整

■方法

Figure8.6a：問題の最初に表示されるスクリーン

生徒の課題：変数を定義し、式を作って計算し、表を埋めて問題を解くこと。

Figure8.6b：問題の回答が表示されたスクリーン

問題の主要な部分：式 $12 + 45x$ を立てること。

レッスンの本当のゴール：生徒に、式の立て方や式を使って問題を解く方法を教えること。

レッスンの内容：類似の問題が 18 問

2 問は生徒を正しく導くための問題で、残りの 16 問で眼球運動が測定された。

参加者：幾何学の前もしくは幾何学の最初のクラスにいる生徒 (**tutor** の使用経験有り)

調査は 1 日に 4 回の割合で連続して 4 日間実施した。

眼球運動測定装置：ISCAN 社製のヘッドマウントタイプのものを使用

■調査の目的

視覚的な注意に関するデータへのアクセス：生徒の問題解決過程に関する深い推論を可能にする。

プロジェクトの主要な動機

(1)利用できる情報の増加がもたらす新しい教育の機会を検討すること。

(2)生徒とインタラクションできる ACT-R/PM モデルを開発すること。

6 つの事例：教育の機会を示唆する典型的な眼球運動の例を示す。

生徒の眼球の動き：黒い斑点（停留点）の系列

斑点の濃度：停留時間の長さによって変わる（長いと濃くなる）

1. Student has Shifted Attention to a Different Part of the Problem Without Informing the Tutor.

■生徒の注目部分とチューターの判断のずれ

生徒が現在考えている部分：チューター側の判断が異なる場合がある。

例) 生徒が前提を入力するセルを選択した状態で次のセルの答えを考えている。

Figure8.7a：生徒は最初の質問の 5hours に注目し、その後セルに 5 を入力

停留点の少なさ：眼球の動きが短く、直接的であることを示す。

Figure8.7b：生徒は問題文の情報を入力するためにセルを選んだが、先に飛ばして標高を計算

問題文全体に渡る停留点：生徒は問題文から与えられた情報の入力をせず計算をしている。

⇒答えはあっても入力部分が違うので誤りとして認識されてしまう。

入力エラー避ける方法：眼球の動きを使用して認知的な注意の切り替えを検出し介入する。

■分析データの抽出

眼球運動を測定した 16 の問題：各問題は複数の質問に分かれている。

各問題の質問 1 のセル(Q1-Left)を検討している間のデータを参加者ごとに抽出
分析に使用したデータ：16 問中 3 回以上入力エラーをしていた生徒 6 名
眼球の動きに基づいて認知的な注意の推移を予測できるかどうか検討

■認知的な注意の切り替えの検出方法

予測変数：47

- ・ 停留点の数(23)
- ・ 各 POR(point-of-regard)範囲の停留時間：ある範囲内にある停留点の総停留時間(23)
- ・ タスクの始まりから最初のキー入力までの潜時間(1)

注意のシフトの確率と強い相関：問題文に対する停留の数と問題文に対する総停留時間

Figure8.8：注意のシフトの確率と問題文に対する停留数の関係

15 以上の停留している場合は、ほぼ確実に注意の切り替えが起こると考えられる。

■介入方法の検討

理想的な介入のタイミング：生徒がどんな状況の時に指摘すべきかを考える必要がある。

生徒が間違いの方向に向かっていることが確実なときにだけ介入すべきである。

- ・ 答えが間違っているという事実の後に素早くシンプルにエラーを伝える。
- ・ 事前に生徒に”問題文に与えられた情報について作業しましょう”のように警告する。
- ・ チューターが注意の切り替えに適応するようなデザインにする。

2. Disambiguation of Solution Method.

■問題による解決方法の違い

生徒による解の導出過程の検討：各生徒や各問題によって異なる解決パスが見られた。

代数の式を利用する生徒と問題文に戻ってそこから考える生徒の対比

眼球の動きから両者を明確に区別することができる。

Figure8.9a：式を使用して解決した生徒は式の上に繰り返し停留している。

Figure8.9b：問題文を使用して解決した生徒は問題文に繰り返し停留している。

■式を使って答えを計算するときより正確になるか？

問題文と式の停留頻度の分析：各問題のうち初めて答えを算出するときのデータを抽出

問題文と式の範囲のどちらに停留点が存在するかによってラベル付け

- ・ "expression"：式に 1 つ以上の停留があり、問題文には停留がない場合
- ・ "problem statement"：問題文に 1 つ以上の停留があり、式には停留がない場合
- ・ "both" or "neither"：両方にある場合と両方ない場合

Table8.1：各カテゴリの問題の割合と正答率と時間

生徒は問題の 54%は式を見ていた (expression+both)。

正答率のデータ：問題文よりも式を使うことの利点を示している。

正答率について停留パターンの主効果有り：F(3, 142)=3.68, p<.02

正答率の高さ：expression > problem statement (post hoc な Scheffe のテスト, p<.02)

答えの算出にかかった時間

時間について停留パターンの主効果有り : $F(3, 142)=19.69, p<.001$

時間の早さ : **neither** > その他, **expression** > **problem statement, both**

■生徒に数学的な表現の価値を理解させる方法

生徒の方略利用 : 答えからだけでは区別できない.

生徒の眼球の動きを使用することによって区別可能

⇒式の使用を促進するような教育的な介入によって支援可能

3. Failure to Read Messages.

■メッセージの読み取りと失敗

エラーに対するシステムからのメッセージ : 読み取りに失敗する生徒が多い.

Figure8.10 : 問題文の情報を入力する時の古典的なエラーをした後の生徒の反応

“コンピューターはエラーメッセージを提示”あなたは間違ったコラムに入力しています”

Figure8.10a : エラーした後の 18 秒間の眼球の動き

生徒はメッセージを読むのに失敗し, 間違いを説明するために問題全体を見ている.

Figure8.10b : その後エラーメッセージを確認しすぐに間違いを修正

■メッセージの読み取りエラーがどのくらい起こるのか

データの抽出 : 始めてからすぐエラーが発生して, エラーメッセージが表示された問題を抽出

各問題の始めから最初のマウスクリック(メッセージのクリア)までのデータを使用

Figure8.11 : 多くの問題において生徒はエラーメッセージを見ていない.

メッセージウィンドウに停留していない問題 : メッセージが提示された問題の 41%

■教育的な介入

メッセージの読みそこないに対する教育的な支援

- ・メッセージを音読するような口頭のプロンプトの提示
- ・注意を引くためにメッセージを派手にする.

コンピューターのメッセージ : 生徒はいつも有効であると認識しているわけではない.

Table8.2 : 無視されたエラーメッセージの割合

4 日間にわたる眼球運動のデータ : 最後の日にわずかに増加している.

⇒生徒がメッセージを無視して学習していることの明確な傾向は示していない.

■メッセージの評価

眼球運動に関するデータの有効な活用 : 眼球の動きでメッセージを読んだかどうかを判断できる.

メッセージが読まれたときにパフォーマンスを改善できるかどうかを評価できる.

4. Disambiguation of an Error.

■生徒の間違いの解釈

(1)複数の原因で同じ間違いが発生する場合

(2)計算間違いによって予想できないような変な間違いをした場合

⇒(2)については眼球運動のデータがエラーの曖昧さを解消できる.

■眼球運動のデータ

Figure8.12 : 生徒は 2 種類の誤りを同時に起こしている.

- ・ 問題文に書かれた情報を入力するセルに, 計算した結果を入力してしまった.
- ・ 計算した結果も間違っていた.

現在のチューター: これらの誤りを認識できない.

眼球の動き: 結果を計算していることを示す証拠となるパターンを反映している.

チューターによる支援の可能性

- ・ 停留のパターンを同定して適切なフィードバックを調整する
- ・ 生徒の解が誤りで, かつ他のコラムに入れるべきであることを告げるメッセージの提示

5. Student has Failed to Process Some Critical Information for Answering a Question.

■ 問題文の理解

生徒の問題: 答える前に問題文を注意深く読まない.

Figure8.13: 式は問題文の前半を読んで 1985 年と 1980 年の違いを見つけることを求めている.

生徒の視線は 1980 年の情報に決して近づかず, 1985 年の値を直接入力している.

■ 教育的な介入

最も簡単な解決方法: 先生が常に”問題文を読みなさい”と言い続けること.

眼球運動の利用: 問題文を読み飛ばしていることを認識し, 適切なメッセージを提示できる.

6. Student is Off Task.

■ 課題からの逸脱と行き詰まりの判断

課題からの逸脱: 今回の調査では見られなかったが実際の教室では頻繁に起こる.

ほかの事をしているのか, 行き詰っているのかわからない.

診断方法: 反応潜時を使って生徒が困難を感じているかどうかを推測

現在のチューター: 長い反応潜時の間に生徒がスクリーンを見ているかどうか判断できない.

眼球の動きを見ることでスクリーンを見ているかどうか判断できる.

■ スクリーンを探索する眼球の動き

Figure8.14 : 生徒が 1 つの問題に 30 秒以上取り組んでいる間の眼球の動き

注視点が問題文と表の間を素早く移動する運動 (サッカード) が見られる.

⇒セルの解に到達しようとして時間を費やしていることが明らかに読み取れる.

現在のチューター: セルが選択されていることしか認識できない.

眼球の動きを見ることで生徒が助けを必要としていることがはっきりと確認できる.

IMPLICATIONS FOR MODEL TRACING

■ 眼球運動の事例

我々の目的: 現在の **tutor** に対するより細かい粒度の認知の有効性を示すこと

様々な教育的な可能性が明らかになった.

■ 認知モデルへの適用

より細かい粒度で認知をモデル化すること: 必ずしも必要ではない.

実用的な観点からは, 現在の粒度で十分である.