統合認知アーキテクチャの魅力と困難

ACT-Rを利用した研究事例

森田 純哉

北陸先端科学技術大学院大学

共同研究者: 三輪和久、前東、寺井仁、小島一晃、Frank Ritter、橋本敬、金野武

アウトライン

- 統合認知アーキテクチャとは何か？
- ACT-Rのレビュー
- 研究事例
  - 人工物とのインタラクション
  - 他者とのインタラクション
- ACT-Rの魅力と困難

- 認知の統合理論
  ＝統合認知アーキテクチャ
- 心を知覚と運動を含めた
  1つのシステムとみなす

Newell, A. (1994). Unified Theories of Cognition, Harvard University Press; Reprint edition

様々な統合認知アーキテクチャ

at BICA 2010

http://act-r.psy.cmu.edu/

John R Anderson

ACT-R

Adaptive **C**ontrol of **T**hought-**R**ational

ACT-Rによる統合

http://act-r.psy.cmu.edu/actrnews/index.php?id=38

ACT-Rによる心の統合

- 細分化された認知心理学への不満から、統合を目指す

ACT-Rによる心の統合

- モジュールのバッファを条件としプロダクションが発火

ACT-Rによる学習の統合

- シンボリック学習
  - 宣言的知識の取得（事例ベース学習）
  - 新たなプロダクションの生成（コンパイル）
- サブシンボリック学習
  - 宣言的知識の活性値を更新（記憶の活性化と減衰）
  - プロダクションの効用値の更新（強化学習）

問い

プロダクションシステムは前時代的なアーキテクチャでは？

心の科学の最新の問題にアップデートできているのか？

心・脳・社会

安西 (2011)

現代における最大の課題の1つ

心と脳と社会を総合的に理解すること

ACT-R・脳・社会

安西 (2011)

現代における最大の課題の1つ

心と脳と社会を総合的に理解すること

ACT-Rによって

認知の内と外を結ぶ

モジュールと脳部位の対応

2004年の論文での
対応

前頭連合野

大脳基底核

頭頂上葉

後頭葉

海馬

外側前頭前野

線条体

淡蒼球

視床下部

運動野

小脳

内へのアプローチ

- 大脳基底核のニューラルネットモデルとACT-Rの対応づけ
- ニューラルネットでのACT-Rの実装

Stocco, A., Lebiere, C., O'Reilly, R., & Anderson, J. R. (2010). The role of the basal ganglia–anterior prefrontal circuit as a biological instruction interpreter. In *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2010* (pp. 153–162).

内へのアプローチ

- 生理学における人体のモデルとACT-Rを結合
- 学習や意思決定のパラメータを調整

Dancy, C. L., Ritter, F., & Berry, K. (2012.). Towards adding a physiological substrate to ACT-R. In *Proceedings of BRIMS2012*.

外へのアプローチ

- ドライビングをするモデル
- 携帯電話の操作とのマルチタスク状況を設定
- 軌道の乱れなどを予測

Salvucci, D., & Taatgen, N. A. (2010). *The multitasking Mind*. New York: Oxford University Press.

外へのアプローチ

- ACT-Rエージェントから構成される社会
- コミュニケーションを介して各々のゴールを達成

Reitter, D., & Lebiere, C. (2011b). Towards cognitive models of communication and group intelligence. In *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 734-739).

外へのアプローチ

Modeling Decision Making on the Use of Automation

Junya Morita (JAIST, Japan), Kazuhisa Miwa, Akihiro Maehigashi, Hitoshi Terai (Nagoya University, Japan),
Kazuaki Kojima (Waseda University, Japan), Frank E. Ritter (Penn State, USA)

Goal: Construct a model that makes decisions about using an automation system through interaction with a task environment

Result: Successful simulates human data on using automation with the ACT-R utility update mechanism

1. Background

- Ironies of Automation (Bainbridge, 1983)
  - Machines will not completely substitute for human cognition even if it is highly developed
  - Monitoring and decision making about automation using are always needed
- Irrationality of automation using (Parasuraman & Riley, 1997)
  - Over-trust: A tendency to trust too much in automation
  - Distrust: A tendency to trust too little in automation
- Need to understand the process of decision making about automation using

2. Previous study - Extended Decision Field Theory

Extended Decision Field Theory (EDFT model)

- Reliance of automation is determined by the relation between self-confidence (SC) and trust (T)
- T and SC dynamically changes in cyclic computation reflecting Capabilities of auto (Ca) and manual controls (Cm)

Limitations: Abstract mathematical model

- No interaction with a task environment
- No prediction of human performance

Gao, J., & Lee, J. D. (2006). Extending the decision field theory to model operators' reliance on automation in supervisory control situations. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 36 (5), 943-959.

3. Task - Line tracing task

- Two modes of control
  - Manual mode: An operator presses the left and right arrow keys to move the vehicle
  - Auto mode: An automation system moves the vehicle
- Changing modes: Press the space bar
- Ca and Cm are success rates of control (keys do not always work)

An artificial task for manipulating Ca/Cm ratio

4. Model

4.1 Architecture

- Implementation of the EDFT model in the ACT-R 6 architecture
- Visual and motor modules allow the model to interact with a simulated task environment
- Trust and Self confidence are represented as utilities of productions in the ACT-R architecture

4.2 Productions

- 11 productions using the perceptual and motor buffers
- The delays in perceptual and motor modules causes manual disadvantages

4.3 Learning and decision

- Reward triggers
  - Every screen updates except during mode switches (from firing ToAuto/ToManual until finishing key press)
  - All rules fired since previous trigger receive rewards
- Reward values
  - When the vehicle is on the line: 10
  - When the vehicle is off the line: 0
- Initial utility values
  - KeepM, ToLeft, ToRight, LtoS, RtoS, KeepA: 10
  - ToManual, ToAuto: 3
- The utility values of mode switching correspond the threshold in the EDFT model

Gaps between rewards and production fires

Transitions of utility values

Decision Cycle

5. Baseline Simulation

- Model
  - Run the auto mode in the simulated task environment (100 runs)
  - Run the manual mode model in the simulated task environment (100 runs)
- Data
  - Run the auto mode in the actual task environment (65 runs)
  - Participants executed the task only with manual mode (n = 65)
- Performance increases with higher Ca / Cm levels
  - => Confirms the manipulations
- The auto controls are better than the manual controls
  - => Confirms human factors

[Auto] r2 = .994, [Manual] r2 = .996

6. Simulation of the use of automation

- Aim
- To simulate the choice of the auto mode
- Variables
  - 5 levels of Ca (30-70) × 5 levels of Cm (30-70)
- The model and the participants could chose the auto or manual mode during the task

Ca \ Cm	30	40	50	60	70
30	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
40	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
50	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
60	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
70	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s

× 50 runs in random order [model]

× 23 participants in random order [data]

Performance increases with higher Ca/Cm ratio

Decrease with Ca / Cm levels

Adaptive choices

Increase with increase of Ca level / Decrease with increase of Cm level

Significance

- ACT-R modeling of time critical field (include meta-level decision making)
- Predicts performance (Performance and decision interact with each other)

BRIMS2011, CogSci2011

JCSS2011, HBESJ2011

コミュニケーションの成立に関与する認知基盤のモデル

コミュニケーションを成り立たせる認知的なアーキテクチャはどのようなものだろう？

既存の認知心理学の成果を組み合わせることでどの程度の説明ができるのだろうか？

森田 純哉・金野 武司・橋本 敬
北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科

1. 背景と目的

コミュニケーションに必要な認知機能

- 人間の認知＝複雑に絡み合った機能の集合
- コミュニケーションに特化したモジュールは必要か？

汎用的な認知アーキテクチャ (ACT-R: Anderson, 2007) でどこまで説明できるか？

ACT-R: 認知心理学の成果を集積する認知モデリングのプラットフォーム（行動データの正確な予測が可能）

認知心理学で検討されてきた認知機能（ACT-Rが説明する範囲）

2. 課題

コーディネーションゲーム（金野・森田・橋本, 2011）

- 事前に使い方の定まっていない新奇な
- シンボルコミュニケーションのメディアを利用

メッセージ送受信（送信後だたちに）

成功の要素

1. 共通の行動傾向
2. シンボルシステムの共有
3. ターンテイクの利用

メッセージ交換後に移動

位置が一致:+2
不一致: -1
50点で終了

メッセージ作成

3. コミュニケーションの認知基盤

成功したラウンドで状態を記憶

ACT-Rの特徴: プロダクションシステムを中心としたモジュールの結合

ACT-Rの特徴: シンボリックな処理とサブシンボリックな処理の融合

- 推論・意思決定
  - 宣言的知識の適用
  - 効用値（＋ノイズ）を利用したプロダクション間の競合解消
- シンボリック学習
  - 事例の蓄積
  - プロダクションコンパイル
- サブシンボリック学習
  - 宣言的知識の活性値変化
  - 強化学習による効用値の変化

4. モデル

フローチャート

自己事例の利用

他者事例の利用

プリミティブな知識の利用

記号に関する知識（課題環境の操作を通して獲得）

パスに関する知識

移動先・メッセージの決定

宣言的知識を利用した意思決定

プリミティブな知識の利用から事例の利用へ学習によって推移

他者視点の取得を組み込む事例の利用

6. シミュレーション

- セッションの構成
  - トライアルセッション: 60分が経過するか、終了条件に到達するまで実施
  - Tnm: メッセージ無しのテスト
  - Tsm: ターンテイク無しのテスト
  - Tim: ターンテイク有りのテスト

実験: 21ペア、シミュレーション: 30ペア

テスト課題の結果

行動の偏り

Kullback–Leibler情報量の相乗平均

$$B = \sqrt{D_{KL}(P_1||E) \cdot D_{KL}(P_2||E)},$$

$$D_{KL}(P_i||E) = \sum_{n=1}^{N} P_i(n) \log \frac{P_i(n)}{E},$$

N: 選択肢の数

$P_i(n)$: 選択肢nを選ぶ確率

E: 選択確率の期待値

メッセージに利用された記号の割合

基礎データ

	データ	モデル
終了条件に至ったペアの割合	0.66	1.00
終了条件に到ったラウンド数	48.42 (13.36)	57(16.97)
終了条件に至った時間 (sec)	1,830 (559)	1,238 (438)
ラウンドあたりの所要時間 (sec)	38.76 (11.51)	21.35 (2.02)

事例データ

- 本課題に限れば、既存の認知アーキテクチャによるモデルの構成は可能（特別なモジュールを追加する必要はない）
- ただし、メッセージの文法構造・脳機能との対応については未検討
- より複雑な環境での検討が今後必要

人工物との つながり

Morita, J., Miwa, K., Maehigashi, A., Terai, H., Kojima, K., & Ritter, F. (2011). Modeling decision making on the use of automation. In *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1971–1976).

自動化システム

単調な労働から我々を開放する人工物

- 過信による事故
- 不信による非合理

路線追従課題

過信と不信の**バランス感覚**を検討する課題

- マニュアルモードとオートモードの切替が可能
- 両モードの性能（移動速度）を独立に操作（30%-70%）

Maehigashi, A., Miwa, K., Terai, H., Kojima, A., & Morita, J. (2011). Selection strategy of effort control: allocation of function to manual operator or automation system. In *Proceedings of 33rd annual conference of the cognitive science society* (pp. 1977-1982).

ACT-Rモデルによる意思決定

オートモード（別のプログラムが操作）と
マニュアルモード（ACT-R自身が操作）を
ACT-Rが切り替える

ゴール

プロダクション

視覚

運動

強化学習

自機とライン位置
の取得

キー押し

シミュレーション結果

自動化システム
への依存を再現

低　マニュアル性能　高

パフォーマンス

低　オート性能　高

Auto使用率

シミュレーション
条件（5 x 5）

マニュアル性能

オート性能	30	40	50	60	70
30	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
40	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
50	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
60	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s
70	40 s	40 s	40 s	40 s	40 s

スイッチ回数

示唆

- ACT-Rによって自動化システムの利用に関わる意思決定を再現することに成功
- 数理モデルと具体的モデルを統合

EDFTモデル

自動化システムへの依存は信用と自信のバランスにより決定

if $INF_C=1$

$B_C(n) = B_C(n-1) + 1/b_1 \times (C(n-1) - B_C(n-1))$

if $INF_C=0$

$B_C(n) = B_C(n-1) + 1/b_0 \times (B_{Cini} - B_C(n-1))$

$T(n) = (1-s) \times T(n-1) + s \times B_{CA}(n) + \varepsilon(n)$

$SC(n) = (1-s) \times SC(n-1) + s \times B_{CM}(n) + \varepsilon(n)$

- T: Trust on automation
- SC: Self Confidence
- B_{CA}: Belief (subjective estimation) of C_A
- B_{CM} Belief (subjective estimation) of C_M
- C_A: Automation Capability
- C_M: Manual Capability
- INF_C: A binary variable representing whether the Ca is available to the operator
- b_1: Transparency of the system interface
- b_0: Dependency of the initial belief
- s: Decay rate of T and SC
- ε: Noise (Mean 0, SD σ^2)
- z: Initial value of P (T(0) - SC(0))
- θ: Threshold of P defining changes of Auto to Manual and vice versa

Relations between θ and P

Gao, J., & Lee, J. D. (2006). Extending the decision field theory to model operators' reliance on automation in supervisory control situations. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 36 (5), 943–959.

他者とのつながり

Morita, J., Konno, T., & Hashimoto, T. (submitted). The Role of imitation in generating a shared communication system.

問題

我々の社会に流通するシンボルコミュニケーションシステム

どのような認知的メカニズムを介して成立したのか

仮説:

相互に模倣し合うことでシンボルコミュニケーションシステムが共有される

乳幼児の言語獲得における模倣 (Tomasello, 1999)

コーディネーションゲーム

シンボルを組み合わせたメッセージを交換ができる

繰り返す

同じ所に行きたい２人がいる

メッセージが通じなければすれ違い

- Galantucci (2005) を参考

コーディネーションゲーム

ラウンドの繰り返しにより
シンボルの意味に対する合意が形成
＝コミュニケーションシステムの形成

- Galantucci (2005) を参考

コミュニケーション成立の実験

- 通常のコミュニケーションを制限された被験者のペアが取り組む

実験参加者: 21ペア

利用できた図形: □ ■ ▱ ▼ ◆ ▲ ×2

終了条件: 同じ位置に移動した場合2点、移動できなかった場合-1点を加算し、50点に至ったら終了

コミュニケーション成立のモデル

エージェントの画面が交互に出現

エージェントを0.5秒毎に交代
（非同期のインタラクション）

モデルの構成

課題の状態を表すスロット

視覚モジュールや宣言的モジュールにより埋められる

location		symbols		Order
self	partner	self	partner	
from to	from to	left right	left right	
■ ■		◆ □	□ ▲	1st

成功したラウンドで状態を記憶

ゴール

宣言的

プロダクション

現状の認識

アクション

決定

視覚

運動

キャラクターの位置を取得

座標上のシンボルを取得

マウス移動

クリック

エージェントB

エージェントA

location		symbols		Order
self	partner	self	partner	
from to	from to	left right	left right	
■ ■	■ ■	□ ▲	◆ □	2nd

2体のACT-Rエージェントが各々の課題環境を操作

事例の利用

事例により空白のスロットを埋める

現在のゴールバッファとマッチする事例を検索

バッファに事例を呼び出し

模倣による利用

フリップした状態で
スロットを埋める

自分とパートナーを
フリップした事例を検索

バッファに事例を呼び出し

模倣の果たす役割を検討する
シミュレーションを実施

シミュレーション結果

模倣を加えることで、人間と同程度の速度でコミュニケーションシステムが成立

終了条件に至ったペアのみを対象

シミュレーション結果

模倣によりペア内でメッセージが共有

データは模倣ありモデルに比べ低い類似度

（人間にとって模倣は困難？）

示唆

- コミュニケーションの起源を探る構成論的アプローチ
- 脳計測との統合

まとめ

ACT-Rの魅力と困難

ACT-Rの魅力

- 心の科学の全体を見とおす統合性
- 人間の行動と対応付ける具体性
- 意識をイージーに表現する分かりやすさ

ACT-Rの困難:その1

- コーディングの難しさ
- モデル＝独立したルールの結合

×10

ACT-Rの困難: その2

- 不幸にも、この本にまとめた進展は、人間の心に関する知識の蓄積ではなく、ACT-Rの進展とみなされがちである。Herbert Simonは、最後の数年間において、理論のブランドネームを見ることへの不満を述べていた。1988年の講演のアブストラクトに、次のように書いている:
  - モデルの研究は、複雑なシステムによって実装される。そのシステムの中で複数のメカニズムが相互作用し、何らかの出力を生み出す。我々はモデルの研究の進展を、 L.T、 GPS、EPAM、Soar、BACON、ACT-Rのようなプログラムの名前を用いることで語る。しかし、本来はプログラムに埋め込まれたメカニズムこそ議論すべきである。ブランドネームは、メカニズム間の比較や分析を難しくし、研究グループ間での知識の交換を困難にさせる。物理学者は、量子力学をハイゼンベルグブランド、シューレディンガーブランドなどに分割しなかったではないか。
- NewellとSimonこそが心理学にはじめてブランドを持ち込んだと考えればこの不満は皮肉なことだ。

Anderson (2007) の最後の章

Unified theories of cognition
から

The unified theory of cognition
へ？