

Toward an Understanding of Analogy within a Biological Symbol System

Holyoak, K. J., and Hummel, J. E.

In D. Gentner, K. Holyoak, and B. N. Kokinov, Eds., *Analogical Mind: Perspectives from cognitive Science*, pp. 23-58, Cambridge, MA: The MIT press

1. Knowledge Representation in Models of Analogy

過去 20 年で類推的思考に関する研究は多大な成果を挙げた

類推のプロセス[検索・写像・推論・スキーマの帰納]に関する実験的研究が進み、それをシミュレートするモデルの開発がすすんだ

- 命題表現の利用により構造的制約の役割が明示された (Gentner, 1983)
- 構造・意味(表層)・目標による多重制約により類推のプロセスがシミュレート (Holyoak & Thagard 1989, 1995)

これらは学際的研究の成果であり、類推研究は現代認知科学の代表例である

上記のモデルは命題表現を知識表象として組むシンボルシステムであった(Newell 1990)

ローカルな表象[述語・引数]が個々の概念に対応

eg., John love Mary love (John, Mary)

シンボルシステムは類推に限らず、認知プロセスに関するモデル一般に適用されてきた

確かにこれらのモデルは思考のいくつかの側面はシミュレートできた

しかし、検討されていない側面も存在する

- 人間の作業記憶の容量を無視
インクリメンタルに写像が進行するモデルも存在するが、容量の設定に何の原理も組みこんでいなかった(Kean et al 1996)
- プロセスが分断されてモデル化
写像と推論に重点が置かれ(SME, ACME, IAM)、そこに検索が付け加えられる程度(MAC/FAC)。学習(転移)に関するモデルは作られていない

我々の目的はより心理学的・生理学的な基盤に基づく、類推、ならびに関係的推論に関する一般的アーキテクチャを構築することである

我々は未だゴールに到達していない。しかし、生理学的シンボルシステムに重点をおくことが認知科学に利益をもたらすと信じている

生物学的シンボルシステム：脳において実現されている(かもしれない)人間・霊長類に共通する知識表現

我々のモデルは抽象度の高いレベルで神経学的基盤に基づく表象とプロセスを実現した知識は個々の要素を濃い密度で結合したネットワークによって表現される我々の目的は類推のモデルを前頭葉において実現される関係的推論の機能に結びつけることである(Benson 1993; Grafman, Holyoak, and Boller 1995; Shallice and Burgess 1991)我々のモデルで提案される方法は知覚と認知のインターフェースになりうるのだ。

2. Symbolic Connectionism: The LISA Model

LISA (Learning and Inference with Schemas and Analogies)

ニューロンに触発されたシンボルシステム = シンボリックコネクショニストモデル

2.1. Dynamic Binding in a Symbolic-Connectionist Model

関係的推論における要件は role(抽象体)と filler(インスタンス)を独立に表現し、異なる表象間での共通性を発見することである

LISA は役割とフィラーを同期発火(synchrony of firing)によってダイナミックに結合(dynamic binding)する - 役割とフィラーが結合されれば、それらは同期して発火し、結合されなければ要素は同期しない

- Jim loves Mary : Jim は lover と同期して発火、Mary は beloved と同期して発火
- Mary loves Jim : Mary は lover と同期して発火、Jim は beloved と同期して発火

ダイナミックバインディングによる同期発火は神経科学の知見と適合[Singer1999]

仮定 : roll (lover, beloved)に対応するニューロンはあるだろう . フィラーを一時的に格納するニューロンもあるに違いない

2.2. Analog Representation, Retrieval and Mapping

2.2.1. LISA の認知構造と知識表象

LTM : 構造化されたスタティックな知識表象

命題を構造 unit 単位で階層的に符号化 (Figure 2)

Predicate & Object : 述語(役割)とオブジェクトをそれぞれと関連した意味ユニットと結合 (eg., love という関係述語の第 1 引数 Love1 は emotion1, strong1, positive1 と結合)。意味的に共通する述語は同じ意味ユニットを共有し、意味的類似性を実装

SP ユニット:役割とオブジェクトを結合

P : SP ユニットの結合

WM : 時系列的に活性化された LTM 上のユニット (意味・roll・filler・SP・P)

意味ユニットの発火パターンの同期でロール、フィラーをダイナミックバインド
意味ユニットの発火に応じて SP・P ユニットが発火

P ユニットの発火パターンが同期することで写像（別論文の Figure3・ ）

2.2.2. LISA による類推検索・写像

- driver：類推検索・写像をコントロールする表象
- recipient：driver により駆動される表象

旧来のモデルでいわれてきたターゲット/ソースの関係とは必ずしも対応しない
類推検索とは

driver 中の命題 P が発火 SP が発火 Predicate & Object が発火 意味ユニットが
発火 意味ユニットを共有する LTM が発火(WM)

類推写像とは

写像中に同時に活性化した P ユニット間(driver/recipient)のリンクが強化、非同期
の P ユニット間のリンクは弱められる（ウエイトが更新） Driver 中の全ての命題
が活性化し終わったら写像は終了。最終的に構造的に一貫した命題間のユニットは
ウエイトが高くなる

2.2.3. WM の制約

フェーズセット：一度に活性化できるユニット数[4~6のユニット=2つか3つの命題]
フェーズセットの制約により WM に関連した人間の類推のプロセスをシミュレート可能に
順序効果（はじめに作られた対応が続く写像のプロセスを影響する）

2.3. Inference and Schema Induction

2.3.1. Inference

例：ジムはメアリを愛している。メアリはバラが好きだ。ジムはメアリにバラをプレゼン
トした ビルはスーザンを愛している。スーザンは花束が好きだ

“ジムはメアリにバラをプレゼントした” に対応する命題が存在しない 対応する命題が
存在しない場合に推論がトリガリング（それ以前に構築された対応[ジム ビル, メアリ
スーザン, バラ 花束]から新たな命題[ビルはスーザンに花束をプレゼントした]を作成）

2.3.2. Schema induction

2 つの表象で共通する意味ユニットは P ユニットが対応付けられた時点で意味ユニット自
身も活性が高まる(相互結合型のリンクのため)。写像完了後、活性の高くなった意味ユニッ
トを抜き出すことでスキーマが構築

2.4. The Perception-Cognition Interface

LISA は知覚のモデル JIM(オブジェクトの再認)と良く似ている (Hummel and Biderman,
1992)

JIM のアップーレベルは LISA のアルゴリズムと同じものを使用

JIM はオブジェクトの物理量に関する構造 LISA は概念的知識に関する構造
JIM と LISA は n-ary 制約から自由である点も類似

例えば2つの引数をもつ関係と3つの引数をもつ関係の対応付けが可能

記憶中の立方体モデル(8つの頂点) 実際のオブジェクト(複数の頂点が死角)

JIMもLISAも特徴をリスト(ベクトル)により表現しないから自由...要素数の異なるベクトル間の類似度は数学的に計算できない

知覚のモデルと共通点があること、n-ary から自由であることから LISA は推移的推論に関する理論的議論に対する答えを提供する

推移的推論: ビルはチャールズよりも背が高く、アベはビルよりも背が高い アベはチャールズよりも背が高い

推移的推論は推論規則ではなく、ビジュアルなイメージを頭に思い浮かべ、それらのイメージを整列することで行われることが議論されてきた

LISA with MAM (Mental Array Module)

“アベはチャールズよりも背が高いか”を考えるときに作られる表象

- object の高さをあらかず location ユニット
- 関係的述語(greater-than/less-than)を表すユニット

gS = greater-subject, gR = greater-referent

lS = less-subject, lR = less-referent

- location と関係的述語を結合する P ユニット(L×R ユニット)

グレーの線で表される活性性のリンク

あとは、具体的な数値をオブジェクトに割り振れば推移的推論ができるでしょう

どうやって数値を割り振るか

- Gaussian パターンを有りそうなところに割り振る gR に 5 を中心として割り振る(中心) IR は gR よりも低めに 3 を中心として割り振る(less については教示がないから)
- gS を gR よりも 2 つ高く見積もる . lS を IR よりも 1 つ低く見積もる

LISA with MAM は被験者の反応時間をシミュレートすることに成功した

シンボリックな表象のみで空間的推論のメカニズムを再現したことが重要である

-架空のイメージを作ることによって推論をしたわけではない

LISA with MAM は認知と知覚の相互作用を生物学的シンボルシステムの中で説明するはじめの1歩になるかもしれない

3. Working Memory and Relational Reasoning

LISA は限られた数のユニットしか同時に活性化できない

- WM の容量が限られた LISA が巨大な表象を扱うことができるのか
- 人間はどのように WM の制約によって影響をうけるのか

3.1. Scaling Up: How LISA Can Map Large Analogs Despite Limited Capacity

意味的制約のガイドがあれば巨大な表象間の写像が可能

eg., 1991年のJ. ブッシュの類推は巨大な類推

湾岸戦争 第2次世界大戦, フセイン ヒトラー, ブッシュ ルーズベルト(チャーチル),
アメリカ アメリカ(イギリス), フランス サウジアラビア, クエート ポーランド

プラグマティックな情報を操作した実験(Spellman & Holyoak(1992))

被験者は第2次世界大戦に関する文章を読み、その後、マッピング課題

第2次世界大戦に関する文章は重点の置かれている人物・国が操作

- ルーズベルト/チャーチルの活躍に重点
- アメリカ/イギリスの活動に重点

ACMEは湾岸戦争について76、第2次世界大戦について112-124の命題を構成し、心理実験の結果を再現 WMの制約を考慮していなかった

ACMEの表象をLISA形式に変換 Spellman & Holyoakの被験者が読んだ文章と同じ順序でLISAは命題を発火させていった(ヒトラーとフセインを対応付ける命題 ヒトラーとドイツによる第2次世界大戦の開始 チャーチル/ルーズベルトの活躍 イギリス/アメリカのアクション)

Spellman & Holyoak・LISAのシミュレーション結果(Table 5.1)

LISAによるシミュレーションは被験者のマッピングと同様の傾向

イラク ドイツ; ブッシュ 条件に応じてチャーチル/ルーズベルト; クエート ポーランド/オーストリア

ACMEやSMEのようなWMの制約を無視したアーキテクチャでないのにも関わらず巨大な類推をシミュレートすることに成功した

唯一の違い

人間はアメリカとアメリカ, イギリスのどちらかしか対応付けなかった

LISAはアメリカとアメリカ, イギリスの両方を対応付けた

LISAのプロセスを調べてみると...

途中までは人間とおなじように条件に応じて、どちらか片方のみを対応付けていた

しかし、実験材料となった第2次世界大戦の文章の最後の文で、再び、戦争を終結させた国(アメリカ)に脚光があたり、2つを選択することになった

...Spellman & Holyoakの被験者は最後まで文章を読んでいなかったのでは?

3.2. Grouping Effects and Mapping Asymmetries

類推的推論は非対称であるのにも関わらず、多くのモデルは非対称性を扱っていない

非対称性：表象 A 表象 B 表象 B 表象 A

LISA は driver と recipient の区別を採用し、継時的なプロセスによって非対称性の問題を扱う(driver によって対応付けられる recipient の命題が決まる．一旦対応付けられた命題は続く写像をガイドする)

driver 側に明示的な因果関係が含まれている場合は、写像される要素の数が増える

人間相手の心理実験 1

- 条件 1：因果関係の記述が明示的な driver 因果関係の記述が明示的な recipient
- 条件 2：因果関係の記述が明示的な driver 因果関係の記述が非明示的な recipient
- 条件 3：因果関係の記述が非明示的な driver 因果関係の記述が明示的な recipient

写像された要素数：条件 1 > 条件 2 > 条件 3

LISA のシミュレーションではどのような命題をまとめて WM に入れるかによって写像される要素数が変化(どのような命題をまとめればいいのかはモデル設計者もよくわかっていないらしい)

人間相手の心理実験 2

- 条件 1：LISA によって予測される命題セットをまとめて考えるように教示
- 条件 2：LISA によって予測されない命題セットをまとめて考えるように教示
- 条件 3：何もしない

写像された要素数：条件 1 > 条件 2 = 条件 3

LISA では WM の容量によって類推の成否が変化

心理実験 3

- 条件 1：数字を覚えながら類推をする条件
- 条件 2：普通に類推をする条件

関係的類推をした条件：条件 1 < 条件 2

これらから類推写像はワーキングメモリの容量/類推をする際にワーキングメモリに入っている情報に影響されることが示唆

4. Neuropsychological and Neuroimaging Studies of Relational Reasoning

神経的部位に関する研究 (Waltz et. al 1999)

- 課題：Raven's Progressive Matrices 問題(類推みたいな行列写像課題?)
- 被験者：大脳皮質損傷患者[frontotemporal dementia -FTD]

前頭葉の損傷した FTD 患者

前側頭葉の損傷した FTD 患者

側頭葉に比べ前葉葉の損傷した患者は複数の関係的表象を統合した課題の成績が低かった
単一の表象のみに関する課題での成績に差は無かった

イメージングの研究 (Kuroger et al., 1998)

- 被験者：大学生
- 課題：上よりも複雑な Raven's Progressive Matrices 問題
対応付けられる関係構造の複雑さを 5 段階[行列の数]で操作

解決時間は関係構造の複雑さに従って増加

関係構造の複雑さに伴って前頭葉[WM と関連]と頭頂葉[空間認知と関連]が活性化

推移的推論

1. “ Bill は Charles よりも背が高く Abe は Bill よりも背が高い ”

2. “ Abe は Bill よりも背が高く Bill は Charles よりも背が高い ”

前頭葉を損傷した患者は 1 についてチャンスレベル、2 について普通の人と同じレベル

側頭葉を損傷した患者は 1 も 2 も普通の人と同じレベル

0:・:」前頭葉とワーキングメモリの関係は指摘されており (Prabhakaran et al. 1997) 、
ダイナミックバインディングがワーキングメモリの所在である前頭葉で行われる可能性を
示唆する

5. Conclusion

LISA で実現されているシンボリックコネクショニズムは人間、ならびに他の霊長類において
実現される関係的推論の基礎として考えることができる

LISA は分散ユニットのセット上で実現される関係構造の知識表現を提供する

LISA は伝統的なモデルと同様、シンボリックな表象を扱うことができ、それに加えて、分
散表現上での検索と写像の統合、類推的推論とスキーマ帰納の柔軟なメカニズムを実装す
ることに成功した

LISA の重要な側面はダイナミックバインディングによって、類推のプロセスならびに一般
的な関係的推論が作業記憶の容量に制約されることを説明した点にある

関係的に複雑な写像をする際に推論者は複数の役割のダイナミックバインディングを同時
に考慮しなければならない

神経心理学的結果はダイナミックバインディングによる関係的推論が前頭葉(作業記憶)に
依存することを示した

高次推論における神経心理学的検討は始まったばかりであるが新世紀における主要なプロ

2004年3月16日
森田純哉

ジェクトになるであろう