

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号： 20103
 研究種目： 挑戦的萌芽研究
 研究期間： 2009～2011
 課題番号： 21650059
 研究課題名（和文） 空間思考の計算理論

研究課題名（英文） Research on computational theory of spatial thinking

研究代表者

片桐 恭弘 (KATAGIRI YASUHIRO)
 公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・教授
 研究者番号： 60374097

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、空間思考を中核とする問題解決の高次認知活動を対象とした認知心理実験を行い、そこから得られる実証的事実に立脚し、言語思考に関する認知の計算理論との対比に基づいて空間思考を支える計算理論を構想し、その構成要素を明らかにすることを目標として研究を行った。その結果、図を用いた推論では視覚インデックス機構が外的表現としての図の備える制約を利用した推論効率化に寄与していること、表を用いた推論ではオブジェクト知覚機構が表のセルに加えて行や列などの大きな対象の知覚を通じて推論効率化に寄与していることを示した。

研究成果の概要（英文）：This research was aimed at developing a computational theory of spatial thinking as embodied cognition, based on psychological experiments involving spatial/diagrammatic problem solving tasks. We proposed that perceptual mechanisms of visual indexing and object-based visual perception contribute to higher cognitive problem solving through analyses of subject eye gaze patterns observed in transitive inference task and table reading task experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	0	1,500,000
2010年度	800,000	0	800,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	180,000	3,080,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：推論・問題解決、図的推論

1. 研究開始当初の背景

人間の思考様式には言語的な思考(言語思考)と空間的な思考(空間思考)とがある。言語思考については記号処理概念に依拠して計算理論が既に確立しており、認知科学、人工知能研究の基礎を構成している。これに対して

空間思考については、創造的思考あるいは発想支援のための実用的有用性が認識され、情報視覚化やコンピュータインタフェースの研究が進められていたが、それを科学的に基礎づける空間思考の計算理論は確立されていなかった。

一方、脳科学においては、認知と知覚をつなぐ機構に焦点を当てた研究が進められ、特に視覚情報処理に関しては、空間内の対象の位置情報(what)と属性情報(what)とが脳内の別経路を構成することが解明された。また、認知科学の哲学的基礎分野においても、認知と知覚との関係の見直しが進められ、知覚の役割を重視した知覚記号系概念の提唱がなされた。しかし、これらの研究はいずれも計算理論として整備されるには至っていない。

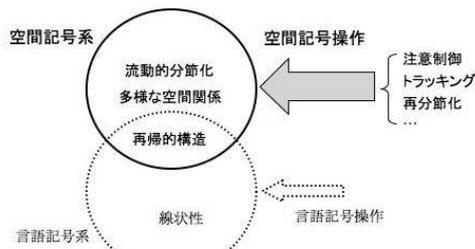


図1. 空間思考の計算理論の構成要素

2. 研究の目的

本研究課題においては、空間思考を中核とする問題解決の高次認知活動を対象とした認知心理実験を行い、そこから得られる実証的事実に立脚し、言語思考に関する認知の計算理論との対比に基づいて空間思考を支える計算理論を構想しその構成要素を明らかにすることを目標とした。具体的なresearch questionとして以下を設定した。

- (1) 空間思考と言語思考とは何が共通で何が異なるか？言語思考の概念が空間思考にどこまで拡張可能で、どのような概念が空間思考に固有なものとして必要となるか？
- (2) 人間は視覚シーンの分節化、再分節化の優れた能力を備えており、空間思考はその能力に大きく依存している。流動的、文脈依存的な分節化に依拠する記号系はどのように定式化されるか？
- (3) 思考の操作としては注意焦点の巧妙な制御、対象のトラッキング、簡略化などが空間思考に固有の操作として挙げられる。空間思考に固有な思考操作にはどのようなものがあり、どのように定式化されるか？

3. 研究の方法

研究サブテーマとして以下の3つを設定した。

- (1) 空間思考における空間記号分節化機構
サブテーマ3の認知心理実験によって得られた知見に基づいて、空間思考問題解決にお

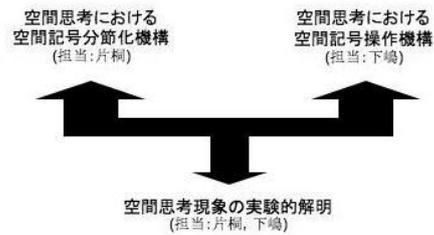


図2. 研究サブテーマ構成

る視覚シーン分節化とその文脈依存性の特性を明らかにし、記号分節化によって得られる空間記号系を計算論的に記述する枠組みを構築する。

- (2) 空間思考における空間記号操作機構
サブテーマ3の認知心理実験によって得られた知見に基づいて、空間思考問題解決の際の注意制御、トラッキング、再分節化の記号操作の特性を明らかにし、空間記号操作の過程を計算論的に記述する枠組みを構築する。

(3) 空間思考現象の実験的解明

空間思考を要求する課題を遂行している際の視線情報を視線追跡装置を用いて取得し、空間思考の認知活動における注意制御を通して空間記号系と空間記号操作に関する手がかりを得る。

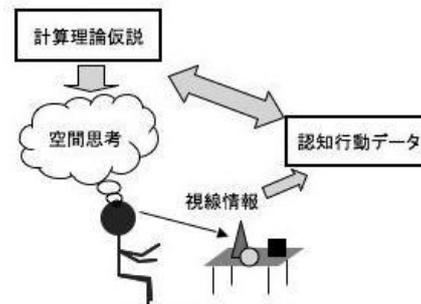


図3. 空間思考実験の概念図

図3に概念的に示したように、空間思考実験では空間思考課題を設定して心理実験を行い、実験参加者の認知行動と視線情報とを観察する。思考に必要な空間記号操作に関する計算モデルを仮定して、実験結果との照合を通じてモデルの検証を進める。計算モデルでは空間記号操作と空間記号分節化を扱った。

4. 研究成果

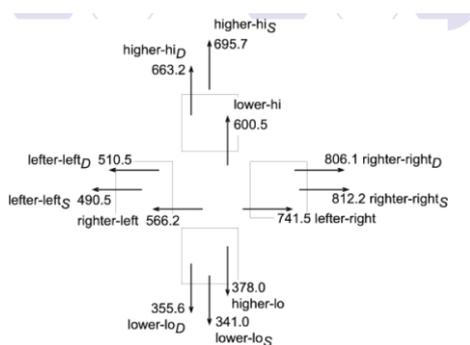
(1) 空間記号操作

図を用いた推論では、要素 A が要素 B の右にあり、要素 B が要素 C の右にあれば必ず要素 A は要素 C の右にあるというように、外部表現としての図の備える制約が推論の結果得られる情報を自動的に提供するため推論を行わなくても図の読み取りだけで推論情報が得られることがある (free ride). 図 4 に示すような不完全な図を与えて遷移推論課題を解かせる実験を行って実験参加者の視線情報と解答にかかる時間を測定した。



図 4. 遷移推論タスク

その結果、図 5 に示すように、推論課題を上下左右のいずれの方向に設定しても、図中に明示的に表示されていない C に言及された時



には対応する場所に向けた視線移動が観察された。

図 5. 遷移推論課題での視線移動

この結果は図的推論が単なる図の読み取りだけではないことを示している。視覚対象や視覚シーン中の場所に向けた注意を管理する視覚インデックスを仮定し、視覚対象や場所に視覚インデックスを置く、視覚インデックスに属性を付与する、属性から視覚インデックスを得る、視覚インデックス間の空間関係を読み取るなどの計算操作を想定すると、視覚インデックスを空間記号として操作する過程としてとらえ直すことができる。

さらに、C の位置が一意に定まらないような推論課題条件を設定すると、課題解決に要する時間が長くなることが観察された。これは視覚インデックスが外部の図を参照する外部記憶機構として機能し、認知的操作過程における作業記憶の負荷を軽減していることを示す。

(2) 空間記号分節化

表を用いた推論では、表の各セルだけでなく、行や列が意味のある対象と対応することが多い。

	A	B	C	D	E
1	■	■	□	□	□
2	□	□	□	■	■
3	□	□	■	■	□
4	■	□	□	□	■
5	□	■	□	□	□

図 6. 表読み取り課題の例

たとえば、図 6 に示す表で行が学生、列がクラブ、黒が所属する、白が所属しないを表わすとすると、各セルはたとえば「学生 1 はクラブ A に所属する」のような単位情報を表現する。それだけでなく、表には「学生 1 は 2 つのクラブに所属している」のような高次情報も含まれる。後者の情報を読み取るには、行 1 をオブジェクトとして知覚して、その属性を読み取るという操作をとった方が、各セルの情報を読み取ってからそれらを複合するよりも効率的である。大きな視覚的対象を知覚するオブジェクト知覚が高次認知と結びつけばそのような読み取り推論操作が可能となるはずである。

図6の表を用いて表読取り実験を行った。「学生2人が所属するクラブはいくつあるか」のように列を対象として知覚すると読み取りが速くなる場合の視線情報を図7に示す。実験参加者の視線は縦の列方向には動かず、ほぼ横に向けて移動している。これは各列をひとつの視覚オブジェクトとして知覚し、列の並びを左から右へとみながら各列の属性を判断するという読み取り戦略をとっていることを示している。

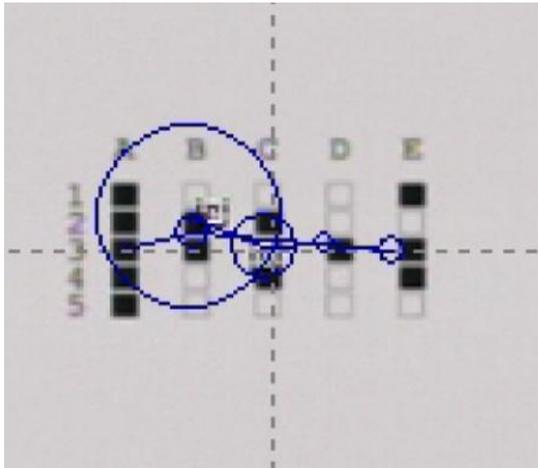


図7. 表読取り課題実験での視線移動

このように、表形式の情報表現読み取りにおいては、行あるいは列のような高次オブジェクトとその属性の直接知覚が問題解決に必要な情報統合を知覚レベルで実現している。

これらふたつの実験から、視覚インデックスおよびオブジェクト知覚が空間思考において記号的推論と視知覚とを橋渡しして embodied cognition を実現する機構として働いているという理論的描像を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Atsushi Shimojima, Yasuhiro Katagiri, and Megumi Enseki, Attending to and maintaining hierarchical objects in graphics comprehension, Diagrammatic Representation and Inference, Lecture Notes in Computer Science, 査読有, 6170, 325-327, 2010.
- ② Atsushi Shimojima and Yasuhiro Katagiri, An eye-tracking study of integrative spatial cognition over diagrammatic

c representations, Spatial Cognition VI I, Lecture Notes in Computer Science, 査読有, 6222, 262-278, 2010.

[学会発表] (計1件)

- ① 片桐 恭弘, Agency reconsidered, NII Grad Challenge meeting, Hakodate, 2011.9.10.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片桐 恭弘 (KATAGIRI YASUHIRO)
 公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・教授
 研究者番号: 60374097

(2) 研究分担者

下嶋 篤 (SHIMOJIMA ATSUSHI)
 同志社大学・文化情報学部・教授
 研究者番号: 40303341