

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11453

研究課題名（和文）形状の変化を対象とする定性空間表現および推論システムの研究

研究課題名（英文）A study on qualitative spatial representation and reasoning system focused on the change of shapes

研究代表者

高橋 和子（Takahashi, Kazuko）

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：30330400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：形状変化について論理的に推論するシステムの基盤を与えることを目的とした研究を行った。時系列で与えられた位相的变化を含む空間データに現れるオブジェクトの形状変化を対象とし、定性空間推論の手法を使ったアプローチをとった。オブジェクトを2次元平面に射影して多角形で近似したものと、極点と曲率で曲線を表現したものの2通りのモデルを考え、それぞれ記述言語を定義して変化を扱う状態遷移系を構築し推論システムを作成した。前者については状態遷移系を記号列の書き換え系と対応させ、系が満たす性質について考察した。後者については妥当性について数学的側面と認知的側面の双方から考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は順序関係をもつ離散的構造を導入した体系の上で状態遷移を考えるというもので、図形の形状を記号表現として扱い論理推論を行う新しい考え方である。記号表現と2次元上の図形の対応はグラフ理論や証明支援系などとも密接に関係した興味深い研究領域を提供する。一方、発生生物学における器官形成過程や高分子物質の構造の変化は形状の変化や分裂などの要素を多く含み、これらの応用分野での新たな見解の発見に寄与できると期待できる。したがって、本研究は計算機科学、発生生物学、トポロジーなどを結ぶ学際的研究であり、それぞれ分野を融合した新しい研究領域の創設につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This research aims at giving a logical basis to the system on which logical reasoning about shape-change is available. We take an approach of qualitative spatial reasoning, and handle shape-change of objects that appear in the spatial data including topological change given in temporal sequence. We propose two kinds of models to the projection of an object onto a two-dimensional plane: an object approximated by polygons and a representation of curves using extreme and curvatures. We define description languages, constitute state transition systems and give reasoning systems to both models. As for the former model, we relate the state transition system to the rewriting system of symbolic strings, and investigate its properties. As for the latter model, we consider the validity from both mathematical and cognitive aspects.

研究分野：情報学

キーワード：定性空間推論 発生生物学 論理推論 トポロジー

### 1. 研究開始当初の背景

定性空間推論は、図形や画像などの空間データを、ユーザの目的に必要な性質のみを取り出して、数値ではなく記号表現で記述し推論する手段である。それは、人間の認知レベルに適合した表現を与え、計算の負担を軽減し、論理基盤をもとにした推論や説明を生成する技術として、人工知能の一分野に位置づけられている。

定性空間推論の研究拠点の多くは国外で、イギリスの Leeds 大学、ドイツの Bremen 大学および Freiburg 大学、アメリカの Maine 大学などに主な研究グループがあり、1980 年代初めから各所でプロジェクトが組まれて記述言語や論理体系、位相的側面、推論アルゴリズムや計算量などの理論から、データベース、地理情報システム (GIS)、ナビゲーション、動画のタグ付けやイベント抽出などへの応用まで幅広い研究が行われてきている。最近では、これまでに提案された体系を統合する研究とともに、ビジョンや機械学習と融合した動画解析への応用が目立つ。しかし、形の変化を対象としたもの、特に位相的な変化や分裂などをとらえたものはほとんどない。

定性空間推論の研究分野で、オブジェクトの形状を扱ったものとしては以下があげられる。Galton は、体系 RCC でオブジェクト同士の関係の 1 つとして定義された PO 関係を取り上げ、2 次元上オブジェクトを対象として線の形状に着目することで詳細化し、領域や線の重なり方を分類する記述方法を提案した [1]。Cohn はオブジェクトに含まれる凹凸の数やそれらの相対的大きさなどを使って形を表現する方法を提案した [2]。報告者自身も凹凸の記述ができる言語を独自に提案している [3]。また、定性空間推論の生命科学への応用として Bittner の仕事がある [4]。彼は、生物のもつ器官の位置関係を表現するためのオントロジと形式的体系を定義しその正当性の証明をしている。しかし、これらの研究はすべて形の区別や分類のための記号表現を与えるだけで、変化については言及しておらず、これらの手法を拡張するだけでは連続的な変化は扱えない。

一方生命科学や高分子化学の分野は、数理的手法や計算機による支援を取り入れることで発展が期待されており、発生過程における器官形成や高分子物質の構造をトポロジカルに解明しようとする研究は最近の大きな話題となっている。しかし、現象を論理ベースの離散モデルとして扱ったものは見当たらない。

### 2. 研究の目的

本研究は、定性空間推論の手法を使って、時系列で与えられた位相的变化を含む空間データで起こっている変化について論理的に推論するシステムの基盤を与えることを目的とする。特に、形の変化や分裂など、定性空間推論の研究分野では従来扱われてこなかった側面を対象とし、生命科学や高分子化学などへの応用をめざす。論理ベースで行うことで、表現や推論の意味を明確にでき、応用分野での新たな見解の発見に寄与できると期待できる。また、定性空間推論とトポロジーとの関連づけが可能になり、両者を融合した新たな見解が得られると期待できる。

### 3. 研究の方法

主として以下の 5 つのテーマに取り組んだ。

#### (1) 記述言語の提案

2 次元平面上の空でない有限領域で、1 個以上の連結成分をもち、0 個以上の穴をもつようなものを対象オブジェクトとする。対象オブジェクト全体の集合を、形の特徴に基づいて有限個のクラスに分類する。そのために、どのような特徴をどのような粒度で分類するかを定め、それに即した記述言語を定義する。粒度の粗い分類として、オブジェクトのもつ連結成分の数、凹部分の数、内部に含まれる穴の数などを特徴として考慮し、サイズ、凹部分の位置などは区別しないようなものを考える。この時、連結成分の数、凹部分の数、内部に含まれる穴の数がすべて 1 個のオブジェクトに限ると、対象は図 1(a)-(d) に示すような 4 個のクラスに分類される。粒度を細かくし、凹部分と領域の境界との接触の有無を分類条件に加えると、(b)、(d) はさらに分割されてそれぞれ (b1)、(b2) および (d1)、(d2) のクラスが加わり、全体は 12 個のクラスに分類される。



図 1: オブジェクトの分類

#### (2) 推論システムの構築と実装

分類されたクラス同士について概念近傍を調べ、それに基づいて遷移オペレータを導入して状態遷移系を定義する。概念近傍は 2 つのクラスが別のクラスを経ずに直接遷移可能であるこ

とを示すもので、時間的な変化を扱う際の制約条件として多くの定性空間表現で使われている。本研究では形状変化の連続性を反映したものに相当する。

(3) 状態遷移系の性質の調査

この状態遷移系で、遷移オペレータ同士の交換則や結合則、同じ初期状態から異なる系列が同じ目標状態に到達する性質(合流性)などの特徴について調査する。

(4) 体系の妥当性の検証

提案した分類方法や状態遷移系の妥当性を数学的側面と認知的側面の 2 つの側面から検証する。状態の特徴や概念近傍の連続性が数学的に定義できるかどうかなどを中心に検討する。また、記号表現に対応するモデルの変化と人間が認識する形状変化との整合性について被験者実験を行い人間の認知と照合するかを調べる。

(5) 応用

発生生物学における器官形成過程では形の変化が多く見られるため、これを対象として形の特徴をとらえた記述言語を提案し、それをもとに変形過程の説明や変形についての推論をするシステムを構築する。形の変化に対する一般的な状態遷移システム上の推論により、遷移可能な状態や理論上可能と考えられる状態の系列をすべて提示することができる。この中で、発生異常に対応する系列の対応づけ、実際には特定の系列しか通らない理由の説明、形成器官の種類によって通る系列が分類できるならば新たな知見が獲得できる可能性がある。発生生物学以外の分野への応用についても検討する。

4. 研究成果

まず、発生生物学における器官形成過程を対象とし、形の特徴をとらえた記述言語を提案し、それをもとに変形過程の説明や推論をするシステムを構築した。器官形成過程では、胞胚と呼ばれる球体が各器官に変化していくときに、凹部の形成、境界線上の接点の生成、分裂という形の変化が特徴的に見られる。この変化を 2 次元平面に射影しその上での形状変化として考えたモデルを生成した。モデルとしては多角形による近似と滑らかな曲線を使ったものの 2 通りを考え、それぞれについて記号表現を考案し形状変化に対応する推論規則をこの表現上で与え、状態遷移系を構築した。1つ目の記述言語は回転角を使ったものであり多角形の周を辿る際の回転角を列として記述することで1つの形を表現し、状態遷移系を定義した。さらに、状態遷移系を記号列の書き換え系と対応させ、合流性や対称性など系が満たす性質について考察した。2つ目の記述言語は極点と曲率に基づくもので、曲線を辿る際の曲率の変化を列として記述することで1つの形を表現した。そしてプロセス文法を使って状態遷移系を定義した。閉曲線は自分自身と交差しないという特徴をもち、形状変化においてもこの性質を保持することをを使って遷移条件を定めた。この記述言語に基づいて定義した状態遷移系を図2に示す。エッジで示しているものが状態遷移規則であり、エッジで直接結ばれていない形状同士は直接遷移しない。

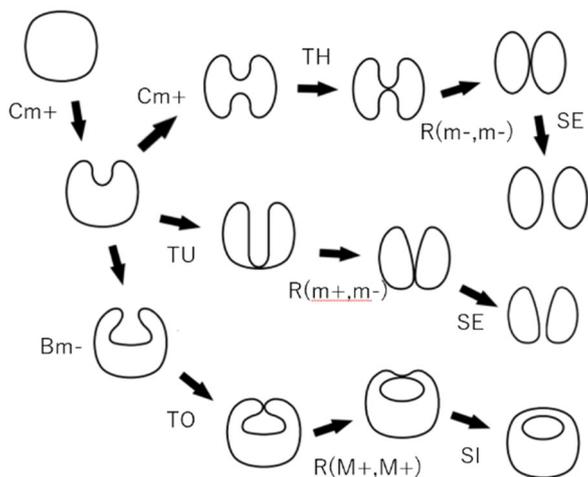


図 2: 状態遷移系

これら 2 通りの手法によって、器官形成過程で頻繁に観察される変化を記号的に表現し、変化が起こる理由や過程を提示したり、与えられた形から起こりうる変化を推論できるようになった。最終的には曲線を自然に表現できる 2 つ目の記述言語を採用し推論システムとして確定し、その妥当性について 2 つの側面から検証した。

1つは数学的側面であり、この記述言語の数学的性質についての考察である。扱った定性的変化にはトポジカルな変化としては説明できないものもあり、定性的な変化にトポロジー以外の手段で数学的基盤を与える方法について検討した。その結果、グラフの平面埋め込み問題、平面の塗り分け(分割)問題、結び目理論など関連分野も多いことから、平面上の描画可能性問題に帰着させて考えることにした。対象オブジェクトは細胞セルがシート状になったものを境界に

もつため、モデル上では自己交差のない閉曲線に対応する。そのため、記号表現が与えられたときに 2 次元平面上で自己交差なしの閉曲線が描けるための条件および状態遷移規則を適用できるように記号表現が満たすべき条件について検討した。さらにこの問題を一般化し、凸な複数の単純な有限ラインセグメントが接している場合、それらの端点を結ぶことでできる 1 つの経路が交差なく描けるための条件を求めた。いずれもいくつかの十分条件を確定し、ある程度の定式化は行えたが、一般性のある証明までには至らず今後の課題となった。

もう 1 つの認知的側面からの妥当性検証については主観的な評価が中心になる。まず、対象のクラス分けの妥当性について検証した。今回対象とするオブジェクトは境界面が細胞セルがシート状になっておりセル同士の接続関係の変化を考える必要がある。最初はシートの厚みを考慮に入れてオブジェクト同士の接続関係の変化を記述する手法を検討した。しかし、詳細な段階ごとの状態変化を定性的に記述するのは難しく、人間の認知としても詳細レベルまでの記述は必ずしも必要ないとの結論になり、比較的抽象度の高いレベルで形状変化を記述することにした。

この点に関しては、Bremen 大学の Christian Freksa 教授を招聘しての議論や、空間情報理論の国際会議 COSIT での口頭発表を通じて他の研究者からもらったコメントが参考になった。また、発生生物学の方面からは変化を引き起こすエネルギーなどの要素の考慮や、変化の確率的要素を加味する必要があるというコメントを受けたが、モデルの複雑化を避けるために今回はこれらの要素は取り入れないことにした。次に、推論過程を可視化するシステムを試験的に実装し、認識との整合性を調べる被験者実験を行った。扱った推論としては変化の過程を前向きに辿るシミュレーションと変化の理由を説明する後ろ向きの遷移であり、図と記号表現との対応もわかるようにした。インタフェースとしての使い勝手やモデルの妥当性について情報科学および発生生物学双方からの評価を受けた。その結果、画像中で形状が変化する部分と記号表現との関係がわかりにくかったため、画像の変化する部分をインタラクティブに指定でき、その部分と対応する記号表現の部分列が表示されるように改良した。図 3 にシステムを動作させたときの表示例を示す。

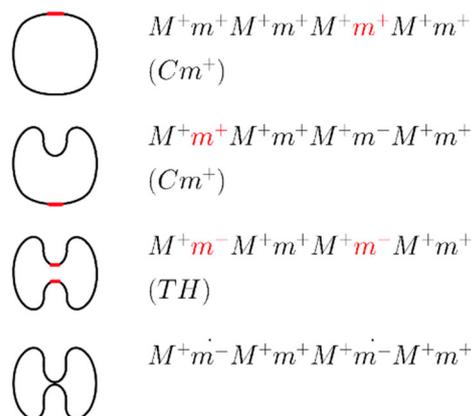


図 3: 可視化システム表示例

この可視化システムは代表的な形状変化しかカバーしていないが、すべての状態の画像をデータベース化することで遷移可能な状態や理論上通ることが可能な系列をすべて提示することができ、推論を理解するための助けとなる。

また、発生生物学以外の分野への応用として、当初予定していた生命科学や高分子化学ではないが形状変化が出現する地質学への応用を検討し、これまでに得られた枠組みから地形の形状変化を扱う試験的な体系を組み立てその妥当性を検証した。

[参考文献]

[1] A. Galton, “Modes of Overlap,” J. Vis. Lang. Comput. 9(1): 61-79 (1998).  
 [2] A. G. Cohn, “A Hierarchical Representation of Qualitative Shape based on Connection and Convexity,” Proc. of COSIT95, pp. 311-326 (1995).  
 [3] S. Kumokawa and K. Takahashi, “Qualitative Spatial Representation Based on Connection Patterns and Convexity,” AAAI08 Workshop on Spatial and Temporal Reasoning, pp. 40-47 (2008).  
 [4] T. Bittner, “Logical Properties of Foundational Mereogeometrical Relations in Bio-ontologies,” Applied Ontology 4(2): 109-138 (2009).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kayo Masuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Factorial affine $G_a$ -varieties isomorphic to hypersurfaces of Danielewski type	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transformation Groups	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00031-020-09631-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Maiko Yamamoto, Yoshiaki Suwa, Kohta Sugiyama, Naoki Okashita, Masanori Kawaguchi, Naoki Tani, Kazumi Matsubara, Akira Nakamura and Yoshiyuki Seki	4. 巻 133
2. 論文標題 The PRDM14-CtBP1/2-PRC2 complex regulates transcriptional repression during the transition from primed to naive pluripotency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cell Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1242/jcs.240176	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Momo Tosue and Kazuko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Towards a Qualitative Reasoning on Shape Change and Object Division	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 14th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2019)	6. 最初と最後の頁 7:1-7:15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4230/LIPIcs.COSIT.2019.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Rajendra V. Gurjar, Kayo Masuda and Masayoshi Miyanishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Affine Space Fibrations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polynomial Rings and Affine Algebraic Geometry	6. 最初と最後の頁 151-193
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-42136-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ghhourabi Fadoua, Kazuko Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 What does the qualitative spatial knowledge tell about the origami geometric folds?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Intelligence and Symbolic Computation 13th International Conference, AISC 2018, Proceedings	6. 最初と最後の頁 139-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-99957-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rajendra V. Gurjar, Kayo Masuda, Masayoshi Miyanishi	4. 巻 19
2. 論文標題 Affine space fibration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Oberwolfach Preprints	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14760/OWP-2018-19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Masanori Kawaguchi, Kota Sugiyama, Kazumi Matsubara, Che-Yi Lin, Shigehiro Kuraku, Shota Hashimoto, Yoshiaki Suwa, Luok Wen Yong, Koji Takino, Shota Higashida, Daisuke Kawamura, Jr-Kai Yu and Yoshiyuki Seki	4. 巻 146
2. 論文標題 Co-option of the PRDM14-CBFA2T complex from motor neurons to pluripotent cells during vertebrate evolution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Development	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1242/dev.168633	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 東末桃, 高橋和子
2. 発表標題 Finding a Route without an Intersection
3. 学会等名 電子情報通信学会コンピューテーション研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東末 桃, 高橋 和子
2. 発表標題 Process-Grammarに基づく形状変化の記述方式の提案
3. 学会等名 人工知能学会第33回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東末 桃, 高橋 和子
2. 発表標題 接点を持つ閉曲線の記号表現の提案とその性質について
3. 学会等名 人工知能学会第111回人工知能基本問題研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 関 由行
2. 発表標題 後口動物における多能性ネットワークの進化的起源とその変容
3. 学会等名 第21回日本進化学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関 由行
2. 発表標題 げっ歯類特異的なエンハンサーの獲得と多能性ネットワークの進化的変容
3. 学会等名 第91回日本遺伝学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関 由行
2. 発表標題 胚性ゲノム活性化を保證するエピゲノム制御の階層性
3. 学会等名 第42回日本分子生物学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momo Tosue, Sosuke Moriguchi, KazukoTakahashi
2. 発表標題 Qualitative Shape Representation and Reasoning Based on Concavity and Tangent Point
3. 学会等名 QR'18 - 31st International Workshop on Qualitative Reasoning (QR2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Momo Tosue, Sosuke Moriguchi, Kazuko Takahashi
2. 発表標題 Operations for Shape Transformations Based on Angles
3. 学会等名 The 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART2019) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kayo Masuda
2. 発表標題 Hypersurfaces with Ga-actions
3. 学会等名 第17回アフィン代数幾何学研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関 由行
2. 発表標題 多能性ネットワークの進化的起源と変容
3. 学会等名 日本遺伝学会第90回大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	関 由行  (Seki Yoshiyuki)  (20435655)	関西学院大学・生命環境学部・教授   (34504)	
研究分担者	増田 佳代  (Masuda Kayo)  (40280416)	関西学院大学・理学部・教授   (34504)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------