

## 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 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500141

研究課題名（和文） 定性時空間推論の体系の構築とその応用に関する研究

研究課題名（英文） A study on the construction of a system for a qualitative spatial reasoning and its application

## 研究代表者

高橋 和子（TAKAHASHI KAZUKO）

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：30330400

## 研究成果の概要（和文）：

本研究は空間データの記号表現と推論の枠組みを提案するものである。特に、2次元のオブジェクトに前後関係や相対の高さの概念が付随するような空間データを対象としてそれらを定性的に扱う仕組みを考察した。その結果以下の成果を得た。表示に関する要求が付随されている矩形を基本図形とし、与えられた複数の基本図形に対してすべての表示に関する要求を満たすような重ね合わせ方を見つける矩形推論システムを完成させ、実装するとともに推論方法の正当性を示した。また、相対の高さをもつ図形データ上で定性シミュレーションを行う手法を提案した。さらに、3次元オブジェクト同士の相対的位置関係表現の時系列が与えられたとき、そこで生起したイベントを抽出する方法を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

This study proposes a framework of symbolic representation and reasoning on spatial data. We investigated the mechanism on qualitative treatment of spatial data of objects on a two-dimensional plane with foreground/background or those with relative height information. We got the following results. We set a rectangle with a requirement on visibility as a fundamental figure, and for a given set of fundamental figures, we find the superposition that satisfies all these requirements. We constructed the reasoning mechanism and implemented it, as well as showed the correctness of the reasoning. We also proposed a simulation method on spatial data with relative height information. In addition, we showed the method for event extraction from a time sequence of qualitative positional relations between objects in a three-dimensional space.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：時空間推論，人工知能，定性推論，ソフトウェア学

## 1. 研究開始当初の背景

計算機の性能向上とネットワークインフラの発達によって年齢や経験を問わず多様なユーザが図形や画像データを扱う機会が増加してきた。画像データの処理には元来多くのメモリと処理時間が必要であり、特に動画は計算機やネットワークに大変な負荷をかけ、時にはネットワーク上での輻輳問題を引き起こす原因となる。さらに、カーナビや携帯電話などの移動体に搭載されたシステムで地図など画像データの適用される機会も増加している。移動体では一般にメモリや表示画面などには制限があり、実時間処理が要求されるとともに、時間的な変化をとともう環境下の推論が必要となる。したがって、図形や画像データをその時間的な変化とともに効率よく扱える仕組が切望される。

時空間に対するプロセスやイベントに自然な記述を与えることは地理情報システム(GIS)の設計・構築、空間情報データベースなどの基礎となるものである。この研究はクロスボーダ的要素が強く、計算機科学者ばかりでなく、地質学者、地理学者、認知科学者、建築家などさまざまな分野の研究者をひきつけている。このことは、Conference on Spatial Information Theory(COSIT)という国際会議が隔年で開かれ、多くの分野からの発表・意見交換が活発に行われていることや、英国で Engineering and Physical Sciences Research Council(ERSRC)による空間データの設計に関するクロスボーダ的なプロジェクトが行われていることからもはかり知ることができる。また、人工知能の分野では、IJCAI, AAAI などの主要国際会議の併設ワークショップとして Workshop on Spatial and Temporal Reasoning がほぼ毎年行われていたり、時空間推論の特別セッションが設けられていたりする。

一般に、図形や画像の表現方法は、画面を格子状に分割し各格子(画素)の集合として表現するラスタデータ、描かれているオブジェクトの位置を座標として表現するベクタデータ方式があり、描画ツールでは構成要素を位置、長さなどの属性をもつオブジェクトを構成要素としてそれらに対する操作を定義している。これらはいずれも図形や画像データを数値として格納し、操作はこれらの数値に対するものとして定義されているため、データ量や計算量が非常に多い。精密なものを要求すればこの傾向は顕著になる。ところが、詳細でクリアな画像の再現が目的でなければ精密なデータは必要でなく、目的によっては、描かれているオブジェクト同士のつながりやオブジェクト数さえわかれば十分であることも多い。

定性空間推論は画像や図形などの空間データを、座標を使った数値データではなく、

ユーザの目的に必要な性質のみを取り出して記号表現で記述しようとするものであり、主たる研究は 1980 年代にはじまった。代表的なものの 1 つ RCC(Region Connection Calculus) では領域を空間を構成するオブジェクトの最小単位とし、領域同士の関係に着目して空間データの構造を表す手法であり、人工知能分野からのアプローチである。RCC をベースとした定性空間推論については英国の Leeds 大学の研究グループを中心に体系の拡張や表現力に関する研究が活発に行われている。これに対して Egenhofer を中心とする Maine 大学のグループの研究は GIS からのアプローチであり、主にデータベースへの応用を対象としている。Bremen 大学では、定性空間表現の位相的な側面や計算量に関する理論研究とともに、ベンチマークを使った実験も行われている。国内では東大の空間情報科学研究センターで GIS の統合や WEB ontology の確立を目標として主に空間データの表現方法に関する研究が行われている。このように、時空間データの表現に関しては多くの手法が研究されているものの、これまでに提案されている手法には、機械的な推論という観点を持ったものは少なく、計算機科学分野からのアプローチはほとんどない。

研究代表者はこの点に着目し、図形を記号表現するだけでなくその表現上で機械的な推論ができるような枠組みの開発を目的として平成 14 年度から定性空間推論の研究を開始し、科学研究費補助金の研究課題としても取り組んできた。その中で、点、線、閉路、範囲という簡単なオブジェクトを基礎とし、領域の接し方に着目して空間データを記号的に表現する枠組みとして PLCA(開発最初は DLCS と呼んでいた)を提案した(図 1)。

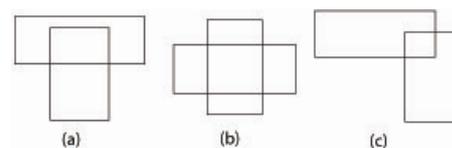


図 1: PLCA では(a)と(b)は区別され、(a)と(c)は同一にとらえる

そして、一連の研究において、空間データから PLCA 表現への変換、表現の等価性判定、2 次元平面上での実現可能性の判定および描画アルゴリズムを提案し、それらの正当性を示すとともに実装も行った。また、PLCA 表現に領域上で成り立つ性質を属性として付加し、その上で位置と領域上で成り立つ性質をあわせた推論方法を確立し、プロトタイプシステムを開発した。

しかし、一連の研究では以下の 2 点がまだ

不十分である。1 つは時間的変化を伴う空間データに対して機械的推論を行う具体的な枠組みが構築できていないことであり、もう1 つは実用的な問題に応用できていないことである。定性空間推論の研究において時空間をつなぐ表現や3次元の複雑な形状への応用はここ数年のホットな話題であり、同時にこれまでに提案されたさまざまな表現の統合についても関心が集まっている。

## 2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では以下の2点を具体的な研究目的とする。

### (1) 定性空間推論の応用の可能性の提示

GIS、ナビゲーションシステムや分子運動の定性シミュレーションなど定性空間推論の応用分野としては多くのものが挙げられるが、実際に具体的なシステムとして提案されているものはない。この原因の1つは、単純な表現を提供するために、抽象度が上がり情報量が限定されてしまうことである。しかし、実用的問題への応用を考えると、情報量が少ないと高度な推論は困難である。逆に抽象度を下げると情報量が増えて計算量的問題が生じる。そこで、本研究では、抽象度を下げかわりに対象とする図を限定するという方針をとることで、実用的問題に応用する際必要な情報を抽出し、かつ妥当な計算量で推論ができるような体系の作成をめざす。

### (2) 計算量を抑えた時空間推論の枠組みの提供

前科学研究費補助金の研究における検討をふまえ、時間的変化を扱えるような体系を構築する。空間データの変化の規則を定性空間表現で与え、さらに、定性空間表現の列が与えられた時、それを支配する動作規則や一連の動作から動作主体の意図を推論する手法を考案する。

本研究の成果として画像や図形データおよびその時間的な変化を記号表現として扱う仕組みが提供できる。理論面での貢献として、位相幾何学ほど抽象度が高くなく、逆に数値計算のように図形データを連続量で表現することもない、空間データの離散表現という興味深い研究分野を成立させる。また、応用面では、計算機やネットワークへの負荷が少なく高速処理可能なシステムを実現する。応用の1つとして、ロボットの動作ナビゲーションシステムが考えられる。このシステムは、センサで認識した一連の画像を処理することにより、そこで起こっていることを推論し、そこから次にすべき動作を導き出す。定性空間推論の適用によって実時間で適切な動作をするようなシステムを実現することができる。

## 3. 研究の方法

以下の4点を中心に研究を行う。

### (1) 矩形推論システムの構築とその応用

矩形推論システムは、表示に関する属性をもった矩形を基本図形とし、複数の基本図形を表示に関する制約条件を満足するように重ね合わせる方法を推論するシステムである(図2)。

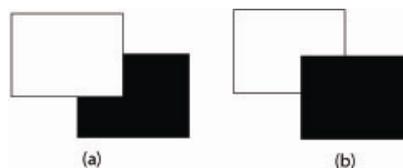


図2：矩形推論では(a)と(b)を区別する

基本図形はサイズや縦横比が可変で表示部分と非表示部分が指定されており、これを定性矩形と呼ぶ。この定性矩形に対して2次元平面上の図に前面/背面という重なり概念を加えた空間上で、表示すべき部分がすべて表示され、そうでない部分は隠されるように重ね合わせて配置する方法を推論する。基本的構想は前科学研究費補助金の研究で既に提案済みであり、本研究では、論理体系の構築とシステムの実装を行う。具体的には、対象となる矩形の集合およびそれらに成り立つ関係を記述する記号表現を定義し、記号表現が与えられた時、それを実現する空間が存在するか否かの判定条件と判定アルゴリズムについて検討する。さらに、矩形をどのように配置すればどの部分が可視になるか、逆に可視にすべき部分が背面にならないような配置が可能かについて記号表現上で推論する体系を構築する。また、この体系が十分な表現力と推論力を持ち、計算量的に問題がないことを示す。矩形推論システムの応用としてマルチウィンドウの自動配置システムを検討する。マルチウィンドウの自動配置システムは、複数のウィンドウを開いて作業する際、ウィンドウが新しく起動されるたびにサイズ、位置、前面/背面への移動などの操作を毎回するのではなく、あらかじめ可視にすべき部分を指示しておくことで、自動的に適切な配置を行うものである。

### (2) 定性空間シミュレーションシステムの開発

定性空間推論は定量的計算に比べ計算量が少ないので、特にシミュレーションに利用すると効果が大きい。実用的問題への定性空間シミュレーションの応用を考えると、地理情報システムと統合的に利用できるのが望ましい。この考えに基づき、地形を定性的に表現しその上で高さの概念を含むシミュレーションを可能にするシステムを構築する。具体的には、既存の2次元データを対象とした定性

空間表現を相対的高さの情報を加えて拡張し、その上で定性シミュレーションを行うシステムを構築し、プロトタイプを開発する。

#### (3) 定性空間表現の時系列に関する推論

定性的に表現された単体または複数のオブジェクトに関する空間データに対して、オブジェクト間の空間的制約条件や動作の連続性をもとに時間的変化を予測したり、一連の定性空間表現に対する動作列からそこで起こっていることの意味や動作主体の意図などを推論する仕組みを構築する。バスケットボールの試合の動画を事例として必要な表現方法を確立し実際の動画に応用する。さらに、その結果をもとに表現方法の問題点と解決策について考察する。

#### (4) 記号表現と空間データとの関係の考察

定性空間推論はグラフ理論、計算幾何学、離散幾何学、位相幾何学など図形データを扱う既存の理論と密接に関係している。それらとの関係性を考察することで、定性空間表現の性質を明らかにするとともに、これら既存の理論で使用されている定理やアルゴリズムを定性空間システムに応用し、効率のよい健全な推論体系を構築する。

### 4. 研究成果

上記の点を中心に研究を行い以下の成果を得た。

#### (1) 矩形推論システムの構築とその応用

まず、定性矩形として表示部分と非表示部分のパターン構成に制約条件をつけ、現実的かつ扱える範囲のものとした。次に、定性矩形の記号表現を確定し、上置きと埋め込みという2種類の重ね合わせに対する関数をこの記号表現上で定義した。さらに、妥当性と有効性の概念を定義した。妥当性とは定性矩形の制約条件を満たしていることであり、有効性とは全体が矩形になっていて継続的に重ね合わせができることである。2つの定性矩形を重ね合わせた結果の妥当性と有効性判定の規則を発見し、これらが満たされるような重ね合わせの条件を示し、正当性を証明した。これをもとに、複数の定性矩形の集合に対して、表示部分をすべて表示し、非表示部分ではできるだけ隠すような重ね合わせ方を推論するアルゴリズムを構築し、矩形推論システムとして Prolog および JAVA 言語で実装した(図3)。さらに、対象とする定性矩形の制約条件を緩和し、表現方法および推論方法を拡張し、より多くの種類の矩形が扱えるようにシステムも拡張した。

また、このシステムを他の定性空間推論システムと比較し、表現力の相違、互いの表現の変換、両者の統合方法についても検討した。

以上により、対象を矩形に限定することで、抽象度を下げながらも定性推論として妥当

な計算量で推論ができるシステムを作成できた。

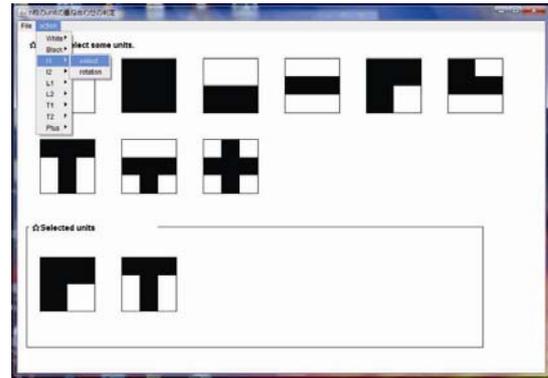


図3：矩形推論システム

#### (2) 定性空間シミュレーションシステムの開発

PLCA 表現は2次元平面上のデータを対象としており、点、線閉路、領域をオブジェクトとしてそれらの包含関係や接続関係によって図形を表現していた。本システムでは、領域の形を矩形に制限し、点に対して相対的高さの情報を加えることで地形を表現できるようにした。この表現の上で水の流れを対象とした定性シミュレーションシステムを構築し、C言語を使ってプロトタイプシステムを開発した。しかし、このシステムは、シミュレーションの際に相対的な長さや大きさの扱いが煩雑であることがわかったため、この部分を改良した新しい表現を提案した。改良した表現では領域同士の接続線に着目し、接続線からみた隣接面の傾きを表現する方法をとった。この表現の妥当性や与えられた記号表現に対する地形の存在の有無を判定するアルゴリズムや制約充足問題との関連について考察した。また、この表現上で高さを考慮した経路探索アルゴリズムを提案した。

以上により、高さの概念をいれた、より実用的問題に応用できる体系を構築する見通しを得た。

#### (3) 定性空間表現の時系列に関する推論

まず、推論の枠組みを構築するために動画の各フレームからオブジェクトを抽出し、オブジェクト同士の関係を記述する方法とその系列から動作を定義する規則を決定した。3次元オブジェクトを対象とするため、正面と真上の2つの視点から観察したオブジェクト同士の相対的位置関係をRCCを使って記述し、それらの列が与えられたとき、生起イベントを抽出する方法を提案した。これをもとにオブジェクトの動く方向や時間的な前後関係を利用して観測方向から見えない部分について推論する方法を与えた。また、この結果をもとに、動作をRCCの列として定義し、動画データから生起イベントを抽出する方法を

提案した。この方法をバスケットボールの試合の動画データに応用した結果、方法が有効であることを確認した。

オブジェクトの抽出は手作業で行ったが、これを自動化した場合の問題点について考察した。動画からオブジェクトを自動抽出するためには一般に矩形を使うことから矩形推論と Cohn らの提案した 9box 表現を候補として検討した。9box 表現は矩形を単位としてオブジェクト同士の相対的位置関係だけでなく相対的方向やサイズなども扱えるもので、接している方向が必要な場合には有効である。これらを RCC と組み合わせることでオブジェクトの位置関係を自動的に抽出する枠組みへの展望が得られた。

以上により、動画からのイベント抽出について計算量をおさえた時空間推論の枠組みを提供することができた。

#### (4) 記号表現と空間データとの関係の考察

定性シミュレーションにおいて水の流れや経路探索においてはグラフ理論や最適化理論の手法をとり入れ、効率のよい健全な体系を構築した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) Miwa, H. and A. Fujihara. Homesick Lev Walk and Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing under Sequential Encounters, Internet of things and inter-cooperative computational technologies for collective intelligence, Vol. 460, pp. 207-231, 2013. 10.1007/978-3-642-34952-2\_9, 査読有。

(2) Konishi, T. and K. Takahashi. "Superposition of Rectangles with Visibility Requirement: A Qualitative Approach," International Journal On Advances in Software, Vol. 4, No. 3&4, pp. 422-433, April, 2012, 査読有。

[学会発表] (計 17 件)

(1) Takahashi, K. "Reasoning about Relative Relationships in 3D Space for Objects Extracted from Dynamic Image Data," ECAI-2012 Workshop on Spatio-Temporal Dynamics (STeDy 2012). pp. 45-51, August 28, 2012, Montpellier, France.

(2) Miwa, H. and A. Fujihara. Real-time Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communications, Proc. SAINT2012, pp. 326-331, Izmir, Turkey, July. 16, 2012. 10.1109/SAINT.2012.59

(3) 小西貴子, 高橋和子: ``矩形同士の埋め込み型重ね合わせについての定性空間推論,`` 電子情報通信学会技術研究報告: 知能ソフトウェア工学研究会, KBSE2011-69,

pp.13-18, March 15, 2012, 名古屋.

(4) Fujihara, A., S. Ono, and H. Miwa. "Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing Under Sequential Encounters for Delay Tolerant Networks," Proc. IEEE INCoS, 279-286, Fukuoka, Japan, Nov.30-Dec.2, 2011. (Best Paper Award)

(5) 小西貴子, 高橋和子: ``矩形同士の重ね合わせについての定性空間推論システムの拡張,`` 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会, September 27, 2011, 沖縄.

(6) Konishi, T. and K. Takahashi. "Symbolic Representation and Reasoning for Rectangles with Superposition," The Third International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data Applications (DBKDA 2011), pp. 71-76, January 25, 2011, St. Maarten, The Neatherlands Antilles, (Best Paper Award).

(7) Dou, R., A. Fujihara, and H. Miwa. "Algorithms for base node location problem in the virtual segment in store-carry-forward routing schemes," Proc. International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, pp. 374-379, Thessaloniki, Greece, Nov. 24-26, 2010.

(8) 小西貴子, 高橋和子: ``矩形同士の重ね合わせについての定性空間推論,`` 人工知能学会研究会資料 SIG-FPAI-B002, pp. 7-14, September 24, 2010, 北海道.

(9) Kumokawa, S. and K. Takahashi. "Rectangle Reasoning: A Qualitative Spatial Reasoning with Superposition" 23rd Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-23), pp. 150-151, May 19, 2010, Florida, U. S. A..

[図書] (計 1 件)

(1) Hazarika, S. (ed.), K. Takahashi, PLCA: A Framework for Qualitative Spatial Reasoning Based on Connection Patterns of Regions Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning: Trends and Future Directions Chapt 2, pp. 63-96, IGI Publishers, 2012.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

高橋 和子 (TAKAHASHI KAZUKO)  
関西学院大学・理工学部・教授  
研究者番号: 30330400

#### (2) 研究分担者

巳波 弘佳 (MIWA HIROYOSHI)  
関西学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 40351738