

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 28 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330274

研究課題名(和文)空間データの記号表現に関する研究

研究課題名(英文)A study on symbolic expression of spatial data

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、報告者がこれまで行ってきた定性空間推論の研究を発展させ、記号的(symbolic)に空間を扱う新しい研究分野として確立することを目的とする。定性空間推論の枠組の1つ PLCA を取り上げその性質を証明支援系 Coq を使って形式化し証明することで、定性空間推論と計算モデルの研究分野をつなぐ一歩となった。また、従来あまり扱われてこなかった3次元データや動画を扱う手法を示し実験評価したことで、定性空間推論の現実的な応用分野へむけた問題点の抽出ができた。

研究成果の概要(英文)：This study aims at an establishment of a research frontier that enables a symbolic treatment of spatial data by extending the author's works on qualitative spatial reasoning. We formalized properties of PLCA, a framework of a qualitative spatial reasoning, and proved them with a proof assistant Coq, which could build a bridge between a qualitative spatial reasoning and a computational model. In addition, we proposed a method of qualitatively handling three-dimensional data and video data and evaluated them, which have little been studied so far. It could find several problems on applying qualitative spatial reasoning to the real application areas.

研究分野：知能情報学

キーワード：時空間推論 計算モデル 定性推論 人工知能 ソフトウェア工学

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。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の画像データが適用される機会も増加している。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輻輳問題を引き起こす原因となる。

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ウ的要素が強く、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ていること、人工知能の分野では、IJCAI, AAAI などの主要国際会議で、毎回のように併設ワークショップや特別セッションとして時空間推論に関するものが設けられていることからもうかがわれる。

一般に、図形や画像は数値データとして格納され、データの操作はこれらの数値に対するものとして定義されるため、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る。

定性空間推論の主たる研究は 1980 年代にはじまった。代表的なものの 1 つ RCC(Region Connection Calculus) 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計算である。これをベースとする研究が英国の Leeds 大学の研究グループを中心にさかんに行われている。これに対して Egenhofer を中心とした University of Maine ではデータベースへの応用をめざした研究が行われている。University of Bremen では、位相的な側面や計算量に関する理論的研究とともに、ベンチマークを使った実験も行われている。一方 Galton は認知的な立場からオブジェクト間の関係を記述する用語(terminology)についての研究を行っており、Ligozat は時空間表現の言語的な側面の研究を行っている。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。

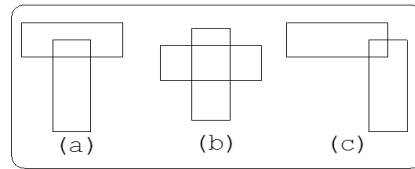


図 1 :オブジェクトの包含関係に着目

定性空間表現の枠組みはいくつも提案されているが、それぞれ何に着目するかによって同一視するデータが異なる。たとえば、図 1 の (a)(b)(c) では 2 つの矩形が交差しているが、RCC[1] ではすべてを同一のものに見なし、PLCA[2]では (a) と (c) のみを同一視する。RCC ではオブジェクトの占める領域同士の相対的包含関係を考えているが、PLCA では線や点の包含関係にも着目しているからである。

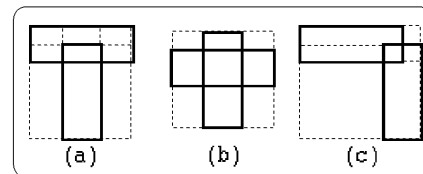


図 2 : 包含関係と相対的方向に着目

包含関係だけでなく方向にも着目したのが図 2 に示す 9box[3]であり、(a)(b)(c)はすべて別のものとする。9box は 2 つのオブジェクトを含む閉包を考え、それを 9 部分に分割して記述することでオブジェクト間の関係を表現する。

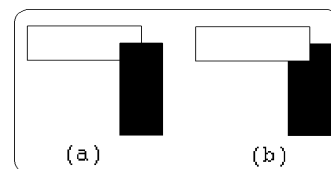


図 3 : 図形の重なりに着目

さらに、図形の重なりを考えた矩形推論システム[4]などでは、図 3 の (a)(b) を区別する。このように目的によって表現の粒度も変わり、表現や推論に必要な計算量も異なる。

報告者は科学研究費補助金の研究課題として平成 14 年から定性空間推論の研究に取り組んできている。まず、多くの応用に適用できるような空間の表現方法として、PLCA を提案した。PLCA は、点、線、閉路、範囲という簡単なオブジェクトを基礎とし、それらにいくつかの束縛条件を付加することで空間データを記号的に表現する枠組みである。その後も PLCA を中心に定性空間推論の研究をすすめてきた。

2. 研究の目的

本研究は、報告者がこれまで行ってきた定

性空間推論の研究を発展させ、空間を記号的(symbolic)に扱う新しい研究分野として確立することを目的とする。具体的には、既存の論理体系やこれまでに明確な論理体系の示されていない枠組みを計算モデルの考え方をもとに形式化し、定義の無矛盾性や操作の停止性等を証明することで理論的な基盤を与えることと、従来あまり扱われてこなかった3次元データや動画を扱えるような枠組みを構築し、それをもとにした推論システムを作成することで現実的な応用分野を示すことの2点を目指とする。

定性空間推論についてはこれまで様々な体系が提案されており多方面の研究が行われてきたが、以下の2点についてはほとんど手をつけられていない。

1つは対象とする空間データの3次元や動画への拡張である。動画を扱った研究はあるが、高さや奥行きのある空間データを扱ったものはほとんどない。本研究では、オブジェクトの相対的な高さや奥行きを考慮した定性空間表現および推論方法を提案する。高さを考慮することで、たとえば水の流れる方向について推論ができるため、建設、土地利用計画や災害時シミュレーションに応用できる。また、段差の有無や坂の傾き等を考えることで、乳母車、車椅子などの走行ナビゲーションにも役立てることができる。また、動画から切り出されるオブジェクトは一般に矩形であり、それらを扱うためには、矩形を基本図形とする表現と推論の枠組みが必要である。さらに、動画は3次元データを2次元に埋め込んだものなので、オブジェクトの重なり(前面と背面)について推論する機能が必要になる。本研究では、9boxや矩形推論システムをベースとして、矩形を基本図形とする表現と推論方法を提案し、動画からのイベント推論や、オブジェクトの形状推論、オブジェクト間の位置関係が満たすべき条件を求める推論等を行うシステムを構築する。これらはセキュリティビデオの検索等に応用可能である。

もう1つは、これまでに提案された論理体系や表現方法の論理的あるいは数理的な性質の証明である。これらはほとんど証明されておらず、実際に定性推論システムを実現した場合、動作の正当性が保証されない。本研究では、PLCAやRCCの定義やその上での操作に対する計算モデルを作成し、その上で成り立つ性質を証明支援ツールを用いて証明する。このアプローチは、これまで人工知能的観点が主流だった定性空間推論に対し、計算機科学からの新しい観点を示す。

本研究は画像や図形データを記号表現として扱う仕組みを提供する。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、空間データの記号表現という興味深い研究分野を確立する。また、応用面としては、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。

3. 研究の方法

以下の3点を中心に研究を行う。

(1) 相対的高さを加えた体系の構築

PLCAの拡張として、オブジェクト間の相対的高さを加えた表現およびその上での推論方法を提案する。このシステムは、2つの領域同士が接している線分に対して、接している各領域の高さが線分の上方にあるか下方にあるかを記述することで2つの領域の相対的な高さの関係を表す。この関係の集合から図形全体の高低や段差、傾斜などおおよその形状が推論できる。まず、この表現の妥当性とその判定方法について考察する。(高さのない)PLCA表現の妥当性条件については、すでに証明しており、それを参考にする。次に、この表現上で高さに関する条件のついた経路検索や水の移動シミュレーションなどについて、効率のよいアルゴリズムを構築しシステムとして実装する。

(2) 矩形を基本図形とする表現と推論方法の提案

これまでに作成した矩形を基本図形とする表現と推論システムを評価し、表現方法を9boxベースのものからより独創性の高いものに変更する。これをもとに、動画からのイベント推論や、ふたを持つ、内部に空洞を持つなどのオブジェクトの形状推論、現状態から目標状態が与えられたときにオブジェクト間の位置関係が満たすべき条件を求める推論等を行うシステムを構築する。アプローチは論理をベースとして時相論理や制約充足の考え方を応用するが、Hidden Markov Modelなどの統計的手法の併用も考慮する。応用として、ビデオデータからのイベント推論システムを作成する。動画から画像編集ツールを使ってオブジェクトを切り出し、この数値データをオブジェクト間の関係を定性的に表す表現に変換し、それらの関係を推論したり、時系列データからそこで起こっているイベントを判定する定性空間推論システムの構築をめざす。一般に、オブジェクトは矩形で切り出されることから、矩形を基本図形とする表現や推論システムが必要になる。さらに、動画は3次元データを2次元に埋め込んだものなので、オブジェクトの重なり(前面と背面)について推論する機能が必要になる。次に、動画から切り出された数値データをこの定性表現に変換するプログラムを作成する。得られた定性表現の列からそこで起こっているイベントを推論する基本的な仕組みを提案する。また、アルゴリズムの最適化をすることで効率化をはかる。

(3) PLCAの計算モデルの作成

PLCAについて、オブジェクトの定義やその上での操作の計算モデルを作成し、このモデルが満たすべき性質を記述して証明を試みる。PLCAは計算機上で実装されているが、

その正当性の証明はなされていない。PLCAの構成要素である各オブジェクトの定義とPLCA上でのオブジェクトの分割、統合などの操作を計算とみなしたモデル化を行ない、これらの無矛盾性、停止性等を証明する。モデル化や証明については Isabelle/HOL, Coqなどの証明支援ツールを使用する。証明によって定義や操作の不備が見つかる場合は、得られた知見を反映させることでより正確なシステムに改良する。上級の使い方や微妙な調整が必要になる場合は、必要に応じて専門家の知識提供を請う。同時に理論面での研究も継続し、定性空間推論の他の体系についても計算モデルを作成してその証明を行う。

4. 研究成果

(1) 相対的高さ情報の表現方法の拡張とアルゴリズムの効率化

これまでにプロトタイプとして開発していたシステムは、2次元座標が与えられた地形に対して、隣接する面同士の傾斜の方向や相対的なサイズを使って地形の凹凸を記号表現したものから、実際の地形の概要を3次元で表すシステムである。本研究では、これまで扱えなかった傾斜方向の組み合わせを扱えるようにし、さらにこれまでは面として矩形のみを扱っていたのを三角形も扱えるように拡張した。また、定性表現の理解を助けるため、入力インタフェースを作成し、GUIを使った入力を記号表現に自動変換できるようにした。この表現上で高さに関する条件のついた経路検索システムをC言語および論理型言語 Prolog で実装した。また、実際の地形を推論する方法を定式化し、一部を Prolog で実装した。

(2) 矩形を基本図形とする表現と推論システムの改良

サッカーの動画を対象とし、選手、ボール、ゴールをオブジェクト、パス、ドリブル、シュートをイベントと考え、まず、オブジェクトの位置関係からイベントを推論するために妥当な定性表現および推論方法を提案した。次に、動画から画像編集ツールを使って矩形でオブジェクトを切り出すための支援システムを作成した。また、得られた数値データをオブジェクト間の関係を表す定性表現に変換し、オブジェクト間の相対的な位置関係の変化からそこで起こっているイベントを判定するイベント推論システムを構築した。このシステムを実際のサッカーの中継動画に適用し、その有効性を確認した。支援システムでは、機械学習機能を取りいれて対象オブジェクトを自動判定するプログラムおよび連続画像の中で同一オブジェクトの対応づけをするプログラムを作成し、これらについても実験評価した。前者については、精度をよくするためにはかなりのデータ量と学習時間を使った調整が必要であり、あまりよい結果は得られなかったが、後者については比較的よい結果が得られたことから、逆

に矩形を基本図形とする表現の時系列から得られる情報を取り込んで精度をあげる手法についても検討した。

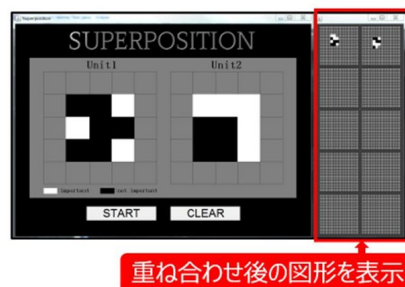


図4：矩形の重ね合わせシステム

また、上記イベント推論システムとは別個に、矩形の重ね合わせに関する推論システムの改良を行った。報告者は、表示すべき部分と隠す部分が明示された矩形のペアに対して、すべての表示すべき部分を前面に出し、隠す部分はできるだけ背面にくるような重ね合わせ方を推論によって求める矩形推論システムをすでに開発している。このシステムに対して扱える単位矩形のパターンを一般化し、さらにこれまでは求められなかった解も含めすべての解を効率よく求める方法を考案し、GUIを使ったシステムとして実装した(図4)。

(3) 定性空間推論の枠組みに対する計算モデルの作成と証明

PLCAの計算モデルを作成し、無矛盾性や2次元性などの性質について証明支援系 Coq を使って表現し証明を行った。机上の証明で見落としていたケースが発見されただけでなく、定義の曖昧性や思い込みによる厳密なモデル化の必要性が判明したため、再度計算モデルを構築した。この計算モデルとして帰納的に定義された PLCA が無矛盾性や平面性などの性質を満たすことは証明できた。この逆、すなわち無矛盾性や平面性などの性質を満たす PLCA が帰納的 PLCA として記述可能であることは、一部は Coq で証明できたが、残りはある補題を仮定することで証明できることを机上で示すにとどまった。この補題は、証明すべき性質の整楚性からむものであり、机上では証明可能なものの、ツールによる厳密な証明では証明にあたって場合分けの全容が明確にならず期間中には証明を完成するには至らなかった。

また、矩形の重ね合わせシステムについても、証明支援系 Isabelle/HOL を使って形式化と証明を行い、これによって、9box や矩形を単位として相対的位置関係を扱う他の定性空間推論システムの形式化の1つの方法を示すことができた。

[1] D.Randell, Z.Cui, and A.Cohn, ``A spatial logic based on regions and connection,`` in *KR92*, 1992.

[2] K.Takahashi, ``PLCA: A framework for

qualitative spatial reasoning based on connection patterns of regions," in "Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning: Trends and Future Directions," S.Hazarika(ed.), Chapt 2, IGI Publishers, 2012.

[3] A.Cohn, et al., "Thinking inside the box: a comprehensive spatial representation for video analysis," in *KR12*, 2012.

[4] T.Konichi, et al., "Superposition of rectangles with visibility requirement: a qualitative approach," *International Journal on Advances in Software*, Vol.4, No.3&4, pp.422-433, 2012.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

- (1) Sosuke Moriguchi, Mizuki Goto and Kazuko Takahashi. "Towards Verified Construction for Planar Class of a Qualitative Spatial Representation," *EPIc Series in Computing*, Vol.39, SCSS 2016, 7th International Symposium on Symbolic Computation in Software Science, pp.117-129, 2016. <http://easychair.org/publications/download/Towards Verified Construction for Planar Class of a Qualitative Spatial Representation>, 査読有.
- (2) Koji Imagawa, Takeshi Fujimura, Hiroyoshi Miwa. "Method for Finding Protected Links to Keep Small Diameter against Failures," *International Journal of Space-Based and Situated Computing*, Vol. 3, No. 2, pp. 83-90, 2013. DOI: 10.1504/IJSSC.2013.056025, 査読有

[学会発表](計23件)

- (1) Shinya Kurimoto, Nao Maeda and Hiroyoshi Miwa. "Polynomial-time Algorithm for Server Location Method for Keeping Small Distance from Clients to Servers During Failures," 7-th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, September 2, 2015, Taipei(Taiwan).
- (2) Fadoua Ghourabi and Kazuko Takahashi. "Generalization of Superposition of Rectangles Based on Direction Relations," The 28th International Workshop on Qualitative Reasoning, August 11, 2015, Mineapolis(U.S.A.).
- (3) 後藤瑞貴, 森口草介, 高橋和子. "定性空間表現の Coq による形式化およびその平面性の証明," 情報処理学会第 103 回 PRO 研究会, 2015 年 3 月 10 日, 産業技術総合研究所臨海都心センター(東京都江東区).

都江東区).

- (4) Fadoua Ghourabi and Kazuko Takahashi. "Formalizing the Qualitative Superposition of Rectangles in Proof Assistant Isabelle/HOL," Seventh International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART15), January 10, 2015, Lisbon(Portugal).
- (5) 榎本真也, 高橋和子. "相対的な位置の高さを扱う定性空間表現と推論," 人工知能学会研究会, 2014 年 3 月 10 日, 宮古島マリンターミナル(宮古島, 沖縄).
- (6) 阪井田政樹, 清瀬崇則, 高橋和子. "定性時空間表現を使ったサッカーの試合動画からのイベントの導出," 電子情報通信学会知能ソフトウェア工学研究会, 2014 年 3 月 7 日, 沖縄県青年会館 那覇, 沖縄).
- (7) Masaki Sakaida, Takanori Kiyose and Kazuko Takahashi. "Qualitative Spatio-Temporal Representation for Event Extraction from Video Data of Football Games," IASTED Artificial Intelligence and Applications 2013, February 17, 2014, Innsbruck(Austria).
- (8) 後藤瑞貴, 高橋和子. "定性空間表現 PLCA のモデル化と妥当性の証明について," 日本ソフトウェア科学会第 30 回大会, 2013 年 9 月 13 日, 東京大学(東京都文京区).
- (9) Kohei Nishida and Hiroyoshi Miwa. "Network Design Problem by Link Protection to Keep Small Increase of Path Length during Link Failures," 5-th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, September 10, 2013, XI'AN(China).
- (10) Shinya Enomoto and Kazuko Takahashi. "A Qualitative Framework for Deriving a Terrain Feature," 27th International Workshop on Qualitative Reasoning, August 29, 2013, Bremen(Germany).

[図書](計2件)

- (1) Kazuko Takahashi, Mizuki Goto and Hiroyoshi Miwa. "Construction of a Planar PLCA Expression: A Qualitative Treatment of Spatial Data, Agents and Artificial Intelligence," 7th International Conference, ICAART 2015, Lisbon, Portugal, January 10-12, 2015, Revised Selected Papers, pp. 298-315, LNAI 9494, Springer-Verlag, December, 2015.

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