

令和元年6月23日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06652

研究課題名(和文) 高速列挙アルゴリズムとHypergraphによるSpace Syntaxの拡張

研究課題名(英文) Extending Space Syntax with Efficient Enumeration Algorithm and Hypergraph

研究代表者

瀧澤 重志 (Takizawa, Atsushi)

大阪市立大学・大学院生活科学研究科・教授

研究者番号：40304133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Space Syntaxが抱える問題点である 厳密解を求めることの困難さ、複数の解の存在可能性、視線による空間の過度な抽象化に対して、高速な列挙アルゴリズム等を用いてそれらを克服することを目指した。まず の問題に対して、極大クリーク列挙により広がりを持った領域として平面・空間の分割を求め、次にそれらの最小の被覆をハイパーグラフの極小横断列挙で求めることで の問題に対応した。さらに、もう一つの重要な分析手法である3次元Isovistを、任意の地点でリアルタイムで任意の解像度の画像として抽出する方法と、深層学習に基づいてその特徴を抽出する方法についても技術開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

適用できる空間の規模が限定されるものの、それまで実現できていなかった、空間の極大な凸被覆パターンを全列挙できる点で、開発した方法は学術的に画期的である。加えて、Axial mapにより線的に扱われていた空間のネットワーク分析を、面的なそれに拡大できたことも意義が大きい。3次元Isovistを精度高く取得しようとする計算時間が線的に増大するが、GPUの機能を利用して高解像度でリアルタイムでそれを取捨する研究はこれまでなかった。また、得られた深度情報の特徴量を明示することなく深層学習で学習させて、景観評価の汎化性能が向上することを確認し、画像を使った空間分析研究での深度情報の重要性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to overcome the following problems of Space Syntax: (1) difficulty in obtaining exact solutions, (2) existence possibility of multiple solutions, and (3) excessive abstraction of space by axial lines using efficient enumeration algorithm. To begin with, for the problem of (3), the division of plane and space was obtained as a region with the extent by the maximum clique enumeration. Then, we solved (1) and (2) problems by obtaining their minimum coverage by using the minimum traverse enumeration in the hypergraph. In addition, regarding three-dimensional Isovist which is another important analysis technique, a method for extracting it as an image of an arbitrary resolution at an arbitrary point in real time and a method for extracting its features based on deep learning were also developed.

研究分野：建築情報システム学

キーワード：Space Syntax 凸被覆 極大クリーク ハイパーグラフ 極小ヒッティングセット 深層学習 3次元Isovist 全方位深度画像

1. 研究開始当初の背景

Space Syntax は、UCL の Bill Hillier らによって提案された空間分析手法の総称である。代表的な分析手法として、視線のネットワークである Axial map, 空間の凸分解である Convex space, 可視グラフ解析 VGA などがあり、他に局所的な可視領域解析の Isovist が含まれることがある。SS は建築の内部空間から都市の道路ネットワークまで様々なスケールの空間分析で用いられている。日本では 1990 年代から用いられはじめ、近年の建築学会大会でも関連する研究が毎年報告されるなど、徐々に普及が進んできている。SS の分析手法の中で最もよく用いられているのは Axial map である。これは空間の幾何的な特徴で決定される視線のネットワークとして空間を分節化し、Integration value や Depth などのネットワーク分析の指標によって空間のつながりの特徴づけようとするものである。この手法が提案された当初は、Axial map は手作業で作成されていたが、計算機への実装が考えられるようになると、その理論的背景が弱いことがたびたび指摘されてきた。Hillier の定義によれば、Axial map は空間全体を監視できる最小個数かつ最長の視線の集合とされていた。しかしこの言葉通りにアルゴリズムを実装しようとしても、人が手で描いたような図を作ることが難しいことがわかってきた。例えば、Axial map は単に視線の集合ではなく、そのネットワークをたどって空間を巡回した際に、隅々まで見て回れる連結した動線であることが暗に仮定されている。さらに動線のトポロジカルな性質も満たすことが暗に要求されており、空間が穴あき状の場合は問題が生じる。

これらの問題に対応するために、1990 年代後半から、何人かの著名な研究者によって Axial map を自動生成するアルゴリズムが提案されてきた。例えば Peponis らは、平面を s-partition, e-partition などの壁面線を延長した凸領域に分割し、それらを全て横断し、かつ連結制約とトポロジカル制約を満たす最小の視線集合を求めるヒューリスティクス(近似解法)を開発した。Turner らは、平面内のオブジェクトの各頂点を結んだすべての視線の集合 (All-lines map) から、極大なものだけを選ぶ Subset elimination と呼ばれる手法を用いて視線を間引き、さらにいくつかのヒューリスティクスを加えて Axial map を作成する方法を提案した。Turner のアルゴリズムは、Space Syntax の解析ソフトとして広く普及している DepthmapX で使われている。これらのアルゴリズムは連続空間に対するものであるが、Batty らは、平面を離散化した各格子で Isovist を求め、それらの直径もしくは面積が大きい順に、平面をできるだけ少ない Isovist で被覆するヒューリスティクスを提案した。

しかしいずれの方法も近似解法にとどまっている。なぜならばこれらの問題は、空間全体を見渡す最小の視線や領域の組み合わせを求めることが本質であるが、これらは集合被覆問題と呼ばれる NP 困難な問題に属するからである。さらに、空間の被覆・凸分割のパターンも一通りではなく、複数存在し得る。これらに加えて、視線の接続関係やトポロジカルな関係の制約が問題を一層困難にしている。近似解法は実装によって結果が異なり、理論的な裏付けを弱くしかねない。計算機科学の分野では、こうした計算困難な問題に対して、計算機の性能向上や新たなアルゴリズムの開発などで、ある程度の規模の問題であれば、実時間で厳密解を求められるほど技術革新が進んでいる。その中で本研究では列挙アルゴリズムに着目する。列挙アルゴリズムは、制約を満たすすべての組み合わせを重複と漏れなく効率的に列挙することを目的としたアルゴリズムであり、唯一の解を出せばよい最適化とは異なる。代表的なアルゴリズムに、バックトラック、逆探索、ZDD などの手法があり、2000 年代から本格的な研究が広がっていった。本研究で扱う列挙問題は、極大クリーク列挙とハイパーグラフの極小横断列挙と呼ばれるもので、いずれも大規模データに対する高速なアルゴリズムが提案されている。

Axial map は多様で複雑性を有する空間の特徴を視線に抽象化して定量的に評価する。こうすると、多様な大きさや形状を有する空間をグラフとして抽象化でき、ネットワーク分析の様々な指標が使えるので都合がよい。街路などの線的な空間を評価するにはこれでよいかもしれない。しかし広がりのある空間には適さない。これは、Axial map が視線のグラフとして空間構成を過度に単純化して表現しているためだと申請者は考えた。加えて近年は境界が曖昧で広がりのある空間構成の場が増えており、新たな分析手法が求められている。申請者は現在の研究助成にて、行為の発生しやすい局所的な領域をクラスタリングする新たな空間の統計的手法の研究開発を行っているが、この研究の過程で、ベースとなる SS の空間分析手法にも変革が必要であるとの認識に至った。

2. 研究の目的

本研究では、前述した Axial map が抱える問題点である①厳密解を求めることの困難さ、②複数の解の存在可能性、③視線による空間の過度な抽象化に対して、高速な列挙アルゴリズム等を用いてそれらを克服することを目指した。具体的には、まず③の問題に対して、極大クリーク列挙により広がりを持った領域として平面・空間の分割を求める。次にそれらの最小の被覆をハイパーグラフの極小横断列挙によって求めることで①②の問題に対応する。しかし視線ではなく領域を空間構成単位とするために、一般的なグラフ分析の手法は使えなくなる。それを克服するため、グラフを一般化したハイパーグラフにより領域単位で空間構成を表現し、Integration value などの特徴量を定義する。そしていくつかの空間で検証を行う。

さらに、Space Syntax のもう一つの重要な分析手法である 3 次元 Isovist に対して、任意の地

点でそれをリアルタイムで任意の解像度で画像として抽出する方法と、深層学習に基づいてその特徴を明示化することなく抽出する方法が、研究を進めていくうえで重要かつ可能であることが見えてきた。そこで、それについても技術開発を行い、空間の印象評価に応用して有効性を検証する。

3. 研究の方法

3. 1 平面の凸被覆の列举と最適化手法の開発

本研究の主目的である空間の凸被覆の列举と最適化は、a.空間のモデル化、b.可視領域の解析、c.単位領域の列举・抽出、d.空間の最小被覆の列举・抽出、e.最小被覆のハイパーグラフ化、f.ハイパーグラフ特徴量の抽出、g.結果の可視化からなる。

a.対象空間のモデル化から説明する。本研究では幾何空間での分析を行うために可視領域解析が必要であるが、これには **Isovist** と **VGA** で可視領域を求める方法がある。本研究ではこれらのどちらの問題に対しても可視領域を求めるが、まずは **VGA** の使用を念頭に空間のモデル化を行った。**VGA** を適用する際、単純にオブジェクトの端点のみを結ぶだけでは、後述する空間分析に意味のある極大な凸領域を十分に抽出できないため、**s-partition** の考え方で、壁面線の延長線と交差する壁面を分割する。

次に b.可視領域の解析を行う。申請者はこれまでの多くの研究で可視領域解析を行うシステムを構築しているが、効率的な処理や後述する列举アルゴリズム等との整合性を図るため、モデル化と併せてデータ構造やコードの見直しを行って統合する。

次に c.単位領域の抽出を行う。単位領域は離散空間の場合、各格子点で求められた **Isovist** そのものになるので特別な処理は必要無い。一方連続空間の場合、各頂点を結んでできる可視な線分の完全グラフを作成し、そのネットワーク上ですべての極大クリークを列举する。極大クリークの列举アルゴリズムには、**Countert** が提案した **ZDD** を用いた方法を実装した。

次に d.空間の最小被覆の列举・抽出を行う。この問題は前述したように **NP** 困難であるが、**ZDD** を使用したハイパーグラフの極小横断列举アルゴリズムを用いることで、ある程度の規模の問題であれば厳密解を全て求めることができる。ハイパーグラフの極小横断とは、ハイパーグラフが与えられた際に、その枝集合の各枝に含まれるいずれかの頂点を包含（横断）する最小個数の頂点の部分集合を求める問題である。本研究で扱う集合被覆問題は、空間内の各頂点をその部分集合である最小個数の可視領域で被覆する問題であるが、その双対問題が極小横断の問題となり、その解が元の集合被覆問題の解と一致する。従って、前のステップで求めた可視領域集合の双対変換を行う必要があり、そのアルゴリズムを開発した。さらに複数の列举結果から、単位領域の和が最大もしくは最小面積となる被覆を短時間で抽出するクエリを、**ZDD** を用いて開発した。

e.最小被覆のハイパーグラフ化は、凸被覆の重なった部分のポリゴンを分割し、それらの分割したポリゴンをノード、元のポリゴンをエッジとみなすことで定義できる。ただし、被覆によってはポリゴンが重ならず接している場合があり、その場合は隣接しているポリゴンに仮想のエッジを設けることでそれらを連結した。

f.において、通常のグラフにおける代表的な **Axial map** の指標のなかで **Integration**（媒介中心性）と **Mean depth** をハイパーグラフ上で求められるように実装した。

g.において、ハイパーグラフは一般のグラフと異なり、線分の集合で対象を表現するのが難しいので、領域の重なりで表現する必要がある。これを視覚的にわかりやすくするために、**GIS** の機能を用いて、重なりを視覚的に煩わしくない程度に可視化した。

3. 2 3次元 **Isovist** の画像ベースの解析手法の開発

本研究では3次元空間評価システムの基盤として、ゲームエンジンとして普及が進んでいる **Unity** を用いる。使用する空間データ基盤は、既存の **CG** マーケットで提供されているものを用いた。当初の研究では、**ZENRIN City Asset Series** の難波エリア（**Japanese Naniwa City**）を用いた。しかし、**CG** モデルのリアリティが低かったため、その後の研究では、**CG** マーケットで販売されている3D都市モデルのデータセットの中から、リアリティが高く実際の日本の都市空間に忠実な、都心と郊外の二つのモデルに切り替えた。後者のモデルでは、**Google Street View (GSV)**の画像に学習したモデルを適用することを踏まえ、街路上に人や車のモデルを設置した。さらにオリジナルの3Dモデルの空間の範囲は、距離画像を学習させるほどには広くないため、同じモデルをコピー・拡張し、遠方のビル等を疑似的に表現した。また、実際の風景写真は、同じ場所の天気、季節、時間帯によって大きく変化するため、**Unity** の天気アセットを使用して太陽の高度や空などの環境条件を変更した。

各観測点の特徴を抽出するために、**Unity** のカメラアセットである **Spherical Image Cam**（現在は販売終了）を利用し、**RGB** と深度の全方位画像を、**GPU** の **Z-Buffer** などの機能を利用して、リアルタイムで撮影・保存するスクリプトを **Unity** 上で作成した。

次に、人の目線、もしくはストリートビューの車載カメラの高さで、街路上の地点をサンプリングして全方位画像の撮影地点を設定した。対象空間で550~2000点ほどの地点を、規則的あるいはランダムに設定した。

後段の研究では、**RGB** 画像から深度画像を推定する方法を開発している。この研究では、深層学習による画像変換手法として比較的新しい **pix2pix** を用いた。

次に、VRを用いて印象評価実験を行うためのインターフェースを、Unityを用いて開発した。一つはCGモデルを用いた印象評価実験、もう一つはGSVの画像を球面に投影して行う印象評価実験である。このシステムを用いて、10名程度の建築系の学生を対象として、50~100地点で印象評価実験を行った。評価は1(悪い)、2(少し悪い)、3(少し良い)、4(良い)の4段階を、直感で判断するよう教示を行った。

次に、取得した画像データと印象評価実験のデータを用いて、クラス分類もしくはランク学習を行う。画像データは同一地点でカメラの鉛直方向を軸として回転させ、18枚程度の画像に増量して学習に用いた。画像は256×256のサイズとし、RGB画像と深度画像の両方を学習に利用する場合は、深度画像はRGBAフォーマットのアルファチャンネルに格納することで、RGB画像と統合した。学習用と検証用データがおおよそ3:1になるようにデータを分割した。クラス分類では、AlexNetとGoogLeNetをCNNとして用いて、CGの景観画像が良いか悪いかの2クラス分類として学習を行った。ランク学習では、GSVの画像評価の10人の被験者による平均値に対して、RankNetによるペアワイズ学習を行った。CNNにはResnet-152を用いた。また、使用した深度画像は、クラス分類の問題ではCGモデルから取得した正確な画像を、ランク学習の問題では、pix2pixのモデルでGSVの全方位画像から推定した画像である。

4. 研究成果

4. 1 平面の凸被覆の列举と最適化手法の成果

最初に、小規模な空間の例として、藤本壮介による情緒障害児短期治療施設のフロアプランを模した平面を用いて検証を行った。サンプリング点の間隔 $l=10\text{cm}$ とした。計算は一般的なノートパソコンを用いて行った。得られた主なオブジェクトの個数は以下の通りである。可視グラフのノード数：179、同エッジ数：1728、得られた極大クリークの数：219、うち壁無しクリークを排除したもの：216、サンプリング点の数：1072、得られた極小横断の数：1543606641113586432(1543京)、最小個数の極小横断の数：凸多角形35個のものが18480通り。さらに計算にかかった時間等は以下の通りである。極大クリーク列挙：0.05秒、極小横断列挙：0.5秒、最小個数の極小横断集合の探索：1秒、最大面積の極小横断の探索：0.01秒、使用メモリ：70MB。結果として、この規模の空間であれば、高速に膨大な組み合わせと厳密解を求められることを確認した。また得られた最適な被覆は、人間の目から見て、違和感無いものであった。

次に、比較的単純なグリッドプランを使い、どの程度の規模の平面までの解が列举可能かを検証した。128GBのメモリを搭載したPCを用いて計算機実験を行った結果、直交プランの場合、分割数 $n=9$ が計算の限界であった。一方内部の障害物をランダムに回転させたプランの場合、 $n=3$ の途中で計算が限界を迎えた。ランダム回転プランの可視グラフの規模は他のものよりも少ないが、他の要因で計算爆発が起きたと思われる。直交プランの場合は、可視グラフの規模や極大クリークの数が最も大きい。他の平面モデルと比較して可視グラフやクリークの配置が単純なため、列举される被覆のパターンが限られたからだと推測される。

最後に、規模が少しでも大きくなると列举に限界が出てきたことがわかったので、最適化問題だけを整数計画法で定式化して、一般的なソルバーで解いてみた。Space Syntaxの研究でよく用いられる、フランスの集落Gassinの平面図を検証用のデータとして用いた。オリジナルなデータは1073点の頂点からなるポリゴンデータであるが、直線状で冗長な線分が多かったため、ArcGISのEliminateコマンドで頂点数を538点に単純化した。サンプリング点の間隔は25cmとした。整数計画のソルバーには有償の高速なGurobi 7.5.2と無償のCBC 2.9.9を用いた。検証の結果、現実的な時間で求解できることがわかった。特にGurobiの結果は高速であった。オリジナルなAxial mapでは、街路の中心部でも比較的長いAxial lineで空間を貫いていたが、本結果では、中心部は細分化された凸多角形で被覆されており、より閉空間としての特徴を抽出する傾向がある。

以上、列举を行う提案手法は小規模な建物では非常に有効であるが、ある程度の規模を超えると適用が不可能になることが分かった。しかし、大規模な平面を対象としても、列举を伴わない最適な凸被覆の求解だけであれば、整数計画法で問題を定式化して最新のソルバーを使えば、十分現実的な時間で求解できることも分かった。

4. 2 3次元Isovistの画像ベースの解析手法の成果

CGの都市景観のクラス分類問題では、撮影した50地点のRGB、Depth、RGBDの画像別にCNNで分類を行った。これらの中で最も誤分類率が低かったのは、RGBDの画像をGoogLeNetで分類した場合であった。このモデルについて、Class Activation Mapping(CAM)を用いてCNNの注目領域を調べたところ、評価値が高い画像は手前から奥までの並木の部分に強く反応し、評価値が低い高架下の画像の場合は、圧迫感を感じる高架下全体が注目領域となった。これらの注目領域は、色情報だけでなく幾何情報も考慮しないと認識することが難しく、深度画像を取り入れたことの効果が表れたものといえる。

次に、全方位のRGB画像からその深度画像を生成した結果について説明する。都市部と郊外の二つの空間モデルとその組み合わせと、曇天と晴天とその組み合わせを掛け合わせて、9つの画像のセットを用意して学習を行った。pix2pixの学習を行い、そのモデルにGSVの画像を入力して深度画像を生成した結果、郊外都市で曇天のデータで学習させたモデルが最も自然

な深度画像を生成できることが分かった。ただし、空の部分にノイズが目立つ結果になった。

そのため、空部分を **Semantic Segmentation** で距離最大とするフィルタリングを行い、100 地点の **GSV** の景観評価に対して、**RGB** 画像と **RGBD** 画像でランク学習を行った。検証データにおいて、推定したランクのスピアマンの順序相関係数 (**SRCC**) を調べると、**RGB** 画像で学習したモデルは、ほとんど予測ができていないどころか、反対の評価を行う誤った方向にモデルが学習されていくことがわかった。一方、**RGBD** データでは **SRCC** が 0.3 程度と必ずしも高くは無いが、検証データでもある程度の評価の予測ができていたことがわかった。

以上の結果から、色情報だけでは都市景観のような空間評価を行うのは不十分であり、汎化性能を高めるために深度情報の必要性が示唆され、既往研究の結果を支持する結果が得られた。しかし、絶対的な精度は高くなかった。理由としては、複数の嗜好の異なる被験者の結果を平均で扱ったことが大きいと思われるが、深度データの精度向上などの改良も今後必要である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) A. Takizawa, Extending Space Syntax with Efficient Enumeration Algorithms and Hypergraphs, 11th International Space Syntax Symposium, Lisbon, pp.176.1-176.15, 2017.7.4

[学会発表] (計 9 件)

- 1) H. Kinugawa and A. Takizawa, Deep learning model for predicting preference of space by estimating the depth information of space using omnidirectional images, to appear in Proceedings of the 37th eCAADe Conference, Porto, Portugal, Sept. 2019
- 2) 衣川雛, 瀧澤重志, 街路空間の全方位 RGB 画像から深層学習により深度画像を生成する方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 金沢工業大学, 2019.9.7
- 3) 瀧澤重志, 空間の解析と生成: 数理・情報科学による計画研究の拡張, 関西建築技術研究会第 301 回本会, 大阪府建築健保会館, 2018.10.31
- 4) 瀧澤重志, 混合整数計画法による比較的大規模な空間の最小凸被覆手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 東北大学, 仙台, 2018.9.5
- 5) 瀧澤重志, 建築・都市空間の計画と分析のための列挙手法, 日本建築学会情報システム技術委員会デザイン科学数理知能小委員会 第 1 回デザイン科学数理知能シンポジウム, 建築会館, 2018.6.28
- 6) 瀧澤重志, 高速列挙アルゴリズムと Hypergraph による Space Syntax の拡張: アルゴリズムの性能限界の確認, 日本建築学会第 40 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, 建築会館, pp.343-346, 2017.12.15
- 7) A. Takizawa and A. Furuta, 3D Spatial Analysis Method with First-Person Viewpoint by Deep Convolutional Neural Network with Omnidirectional RGB and Depth Images, Proceedings of the 35th eCAADe Conference, Rome, Italy, pp.693-702, 2017.9.22
- 8) 瀧澤重志, 古田愛理, 深度情報付き全方位画像を用いた深層畳み込みニューラルネットワークによる一人称視点型 3 次元空間分析手法, 計算工学講演会論文集, 22, ソニックシティー, 埼玉, E04-1, 2017.5.31
- 9) 瀧澤重志, 極大凸多角形集合による平面被覆問題の解の全列挙と最適解の抽出手法, 日本建築学会第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, 建築会館, pp.177-180, 2016.12.8

[図書] (計 1 件)

- 1) A. Takizawa, Extending Space Syntax with Efficient Enumeration Algorithms and Hypergraphs, Albert R. Baswell ed., Advances in Mathematics Research, 25, Nova Science Publishers, pp.131-153, Jan. 2019

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/drtakizawa/>

6. 研究組織

- (1)研究分担者
なし

(2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。