

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：32682

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2012

課題番号：20360044

研究課題名（和文） 時間変化を伴う空間におけるロバスト幾何計算アルゴリズムの構築

研究課題名（英文） Construction of robust geometric computation algorithms for time-varying spaces

研究代表者

杉原 厚吉（SUGIHARA KOKICHI）

明治大学・大学院先端数理科学研究科・教授

研究者番号：40144117

研究成果の概要（和文）：

背景空間の計量的性質が時間とともに変わる環境の三つの事例に対してロバストな幾何計算アルゴリズムを構成した。第一に、時間変化する流れのもとでの船の最小到達時間として定義される距離の計算法を構成し、海難救助船経路計画などへ応用した。第二に、動画を見たときの主観的奥行き錯視量の推定法を構成し、不可能モーション錯視の創作へ応用した。第三に、材料から部品を切り取る際に材料の形状変化に起因する振動を避けるカッターパス計算法を構成した。

研究成果の概要（英文）：

Robust geometric algorithms were constructed in three examples of time-varying spaces. First, algorithms for computing shortest paths for a boat in a time-varying flow field was constructed, and were applied to rescue-boat path planning and computation of rescue-boat Voronoi diagrams. Second, mathematical models of subjective depth perception was constructed and was applied to the design of new illusions named impossible motions. Third, a robust method was constructed to find a cutter path that can avoid vibration due to the change of the material shape.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：数理工学，ロバスト幾何計算，最短到達距離，ボート航行距離，ボロノイ図，主観的奥行き，不可能モーション，カッターパス

1. 研究開始当初の背景

幾何形状に関する情報処理は、パターン認識、コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、地理情報処理、ロボット動作

計画など多くの応用をもつ重要な課題で、その基本的アルゴリズムは計算幾何学とよばれる分野でここ 30 年の間に精力的に研究がなされ、理論体系が築かれてきた。その中で、

本研究代表者のグループは、計算幾何学の理論が数値計算は正しくできるという前提のうえに作られているのに対して、現実の計算は誤差を伴うために、ソフトウェアが理論どおりの性能を発揮できないという困難に注目して、誤差を含む現実の計算環境でも安定して性能を発揮できるロバストな幾何計算アルゴリズムの設計原理を追求してきた。

しかし、計算幾何学のほとんどすべての研究は、背景空間が固定された不変なものであるという前提のもとで開発されてきており、空間自体が時間とともに変化する場合の幾何アルゴリズムの研究はほとんど行われていないのが現状であった。

一方で、海流や風や天候の変更など、時間とともに環境が変わる空間で、移動体の最短経路を求めたいなどの応用の視点から、時間変化を伴う場面での幾何アルゴリズムの開発が求められていた。

2. 研究の目的

背景空間が時間とともに変化する場面の典型例として、「距離計量が時間変化する空間」と「距離の異方性が時間変化する空間」に着目する。そして、これらの空間における最も基本的な概念となる2点間の最短経路とその長さの計算アルゴリズムを誤差に対する安定性を保証した形で構築するとともに、それを現実の問題に応用するためのアルゴリズム体系を築く。

船舶が海上を移動する場面を例にとると、「距離計量が時間変化する空間」とは、低気圧の移動に伴って波の高い領域が移動し、波から受ける力のために速度を落とさなければならない領域が時間とともに変わる空間などである。また、「距離の異方性が時間変化する空間」とは、海流の時間変化（短期には満ち潮、引き潮など、長期には潮流の季節変動など）のために、進む方向ごとの移動速度が時間とともに変わる空間などである。

このような空間においては、船舶の現在地から目的地までの最小時間経路を求めることが、空間の計量を定めるという意味で最も基本的な計算となる。本研究では、そのための計算アルゴリズムを、誤差に対する安定性を保証した形で開発する。

各時刻、各場所、各方向の距離計量の計算法を確立した後には、それを組み合わせて、時間変化する空間において、出発地から目的地までの最短経路を計算する方法、出発地からすべての方向へ向かって移動したとき、ある時刻までに行ける領域を計算する方法、さらに、この領域から時間を逆進させて過去を推定する方法を構成する。

3. 研究の方法

(1) 時間変化する空間において、まず最も基

本的な性質である2点間の距離の計算法を確立し、次にそれを利用して具体的な幾何問題を解くアルゴリズムを開発する。

(2) 距離計算法の開発のためには、私たちの研究グループが最近開発したボート航行距離方程式を時間変化する空間へ一般化してできる偏微分方程式を出発点とする。その解法には、時間変化のない空間に対して、私たちが開発した独立粒子法を拡張する。

(3) 応用を指向して、① 出発地から目的地までの最短経路の計算法、② 出発点からすべての方向へ広がる拡散現象の時間発展計算法、③ 現在の拡散状態から過去へ時間を逆に辿る拡散源推定法、④ 時間変化する空間における衝突検出、衝突回避、勢力圏図構成などの基本的幾何アルゴリズムを構成する。

(4) 計量が時間変化するもう一つの事例として、動画を見たとき知覚される主観的奥行きの変化を取り上げる。人の知覚の数理モデルに基づき、奥行きの錯覚を推定する方法を構成し、新しい錯覚を創作する。

(5) 背景空間が時間変化する他の例も随時取り上げ、関連する問題を解くためのロバストアルゴリズムを構成する。

4. 研究成果

(1) 流れの中でのボート航行距離に関しては、二つの計算法を開発した。その第一は、粒子追跡法を利用したものである。ボートの最短経路の計算には同時刻到達可能領域の包絡線の法線方向が必要となるが、従来の粒子追跡では特異点付近で計算が不安定になる。これを避けるために、各粒子で独立に法線方向を計算する方法を開発した。これは、各粒子の単独の位置と曲率の変化を独立に追跡する方法で、これにより、隣の粒子の位置を参照することなく、曲率と法線方向を求めることができるようになった。その結果、同時刻到達可能領域の包絡線が特異点を持っている場合の計算を安定化できた [雑誌論文 14]。

第二の計算法は、高速前進法を利用したものである。従来の方法では因果関係が逆転するために計算が不正確になるが、流れがもたらす因果関係を判定し、時間順序に沿って計算を行う方法を開発することによって計算を安定化できた [雑誌論文 9]。種々の流れのもとの計算実験によって、これらの方法の有効性を実験的にも確認できた。

さらに、ボート航行距離の計算法を利用して、救助船が海難事故を起こした船舶を救助するための最短経路と、それに基づいた救助船ボロノイ図の計算法を開発した。このボロノイ図は、単に距離をボート航行距離に置き換える通常の一般化ではない。なぜなら事故を起こして自力では動けなくなった船舶は

そこに止まるのではなくて、その後も海流に流されて移動するからである。この移動を考慮した上で、救助船の最短経路を計算し、それに基づいてボロノイ図を構成する。そのためのロバストな計算法を開発した[雑誌論文 1]。

(2) 画像からの主観的奥行き知覚については、知覚の数理モデルを構成し、それに基づいて奥行きのロバストな計算法を開発できた。これをもとに、主観的奥行きと実際の立体の奥行きの違いを錯視量として数値化し、この錯視量の大きさを予測する方法、錯視量の大きい立体を設計する方法を開発した[学会発表 4]。そして、それを利用して錯視をもたらす立体を多数制作し、その一つは錯視コンテストで1位に選ばれた[その他 1]。

当初、この錯視の主な要因の一つは立体の斜面を支える柱の見かけの長さであると考えていた。しかし、柱を取り除いても同様の錯覚が起こることを発見し、それを説明できるように数理モデルも改良した。

柱のない錯視立体を回転させたとき、見た人には立体が時間と共に変形していくという錯覚をもたらすこと、およびこの錯視が、網膜像をできるだけ単純な立体として解釈する人の知覚の性質から説明できることを明らかにした。そして、この理論に基づいて新しい立体錯視を予測し、予測どおりの錯視現象が生じることを試作立体によって確認できた。これら一連の立体を反重力すべり台と名付け、その無限に多くのバリエーションを制作することのできるロバストな設計アルゴリズムも構築した[学会発表 2, 4]。

(3) 硬い材料から部品を切り取る際に、材料形状が時間とともに変わるために、カッターの動きが多様な摂動をもたらす場面、できるだけ振動の生じないカッターの経路を探索する高速アルゴリズムを開発した[雑誌論文 11]。これは、材料の無駄とカッターの動きの無駄を少なくする部品配置法も含んだもので、任意形状図形のパッキング法としても性能のよいものとなっている。

(4) 電池を消費しながらモニターデータを無線送信するセンサーネットワークにおいて、電力消費によって電池の状態が時間変化し、通信できるセンサーノード対が変わるという状況で、センターへのリレー通信を達成するための分散的・局所的計算による経路生成アルゴリズムを構成した。これは、センサー位置を生成元とするドロネー三角形分割の辺のうち無線通信に使える短いものからなる部分グラフに近い構造を局所計算だけで作る手続きと、3種類のデータリレー手法を組み合わせて経路を生成する手続きとからなる。この経路生成法は、センサーノードが非一様に分布していても必ずセンターまでデータをリレーできることが保証される

ものである。計算機シミュレーションによって、得られる経路の質を観測した結果、従来から使われているガブリエルグラフの利用や、相対近傍グラフの利用より高い性能をもつことが確認できた[雑誌論文 3, 12]。

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 16 件)

- [1] K. Sugihara: Rescue boat Voronoi diagrams in time-varying environment. Journal of Information & Computational Sciences (accepted).
- [2] H. Koizumi and K. Sugihara: Maximum eigenvalue problem for Escherization. Graphs and Combinatorics, vol. 27 (2011), pp. 431-439.
- [3] B. Haider, S. Imahori and K. Sugihara: Success guaranteed routing in almost Delaunay planar nets for wireless sensor communication. International Journal of Sensor Networks, vol. 9 (2011), pp. 69-75.
- [4] K. Sugihara, A. Okabe and T. Sato: Computational method for the point cluster analysis on networks. GeoInformatica, vol. 15 (2011), pp. 167-189.
- [5] K. Sugihara: Robust geometric computation based on the principle of independence. Nonlinear Theory and Applications, IEICE, vol. 2 (2011), pp. 32-42.
- [6] H. Fujii and K. Sugihara: Properties and an approximation algorithm of round-tour Voronoi diagrams. LNCS (Transactions on Computational Science IX, Special Issue on Voronoi Diagrams in Science and Engineering), No. 6290 (2010), pp. 109-122.
- [7] D.-S. Kim, Y. Cho and K. Sugihara: Quasi-worlds and Quasi-operators on Quasi-triangulations. Computer-Aided Design, vol. 42 (2010), pp. 874-888.
- [8] D.-S. Kim, Y. Cho, K. Sugihara, J. Ryu and D. Kim: Three-dimensional beta-shapes and beta-complexes via quasi-triangulation. Computer-Aided Design, vol. 42 (2010), pp. 911-929.
- [9] T. Nishida and K. Sugihara: Boat-sail Voronoi diagram and its application. International Journal of Computational Geometry and Applications, vol. 19 (2009), pp. 425-440.
- [10] K. Sugihara: Computer-aided generation of Escher-like Sky and Water

tiling patterns. Journal of Mathematics and the Arts, vol. 3, no. 4 (2009), pp. 195-207.

- [11] S. Imahori, M. Kushiya, T. Nakashima and K. Sugihara: Generation of cutter paths for hard material in wire EDM. Journal of Materials Processing Technology, vol. 206 (2008), pp. 453-461.
- [12] B. Haider and K. Sugihara: An energy efficient routing approach for wireless sensor network. Advances in Computer Science and Engineering. vol. 34 (2008), pp. 261-276.
- [13] M. Moriguchi and K. Sugihara: Constructing centroidal Voronoi tessellations on surface meshes. In M. Gavrilova (ed.): Generalized Voronoi Diagrams --- A Geometry-Based Approaches to Computational Intelligence, Springer, Berlin (2008), pp. 235-245.
- [14] T. Nishida, K. Sugihara and M. Kimura: Stable marker-particle method for the Voronoi diagram in a flow field. Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 202 (2007), pp. 377-391.

[学会発表] (計 20 件)

- [1] K. Sugihara: Why are Voronoi diagrams so fruitful in application? Eighth International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (Qingdao, June 28-30, 2011).
- [2] 杉原 厚吉: 反重力すべり台の設計法. 日本オペレーションズリサーチ学会ワークショップ「娯楽のOR」(神戸, 2011年9月16日).
- [3] 杉原 厚吉: 画像理解と不可能モーション錯視. 日本心理学会大会ワークショップ(東京, 2011年9月15日).
- [4] K. Sugihara: Design of antigravity slopes for visual illusion. EuroCG 2011 (Morschach, March 28-30, 2011).
- [5] K. Sugihara, T. Sato and A. Okabe: Simple and unbiased kernel density functions for network analysis. the 10th International Symposium on Communication and Information Technologies (ISICT 2010) (Tokyo, October 26-29, 2010).
- [6] K. Sugihara: Voronoi-diagram approach to Escher-like tiling. Proceedings of the 7th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (Quebec, June, 28-30, 2010).
- [7] K. Kan and K. Sugihara: Robust ex-

traction of the medial axes of 3D objects. 25th European Workshop on Computational Geometry (Brussels, March, 16-18, 2009).

- [8] K. Sugihara: Toward superrobust geometric computation. ACM Solid and Physical Modeling Symposium (NewYork, 2008年6月2~4日).

[図書] (計 7 件)

- [1] 杉原厚吉: だまし絵の不思議な世界. 誠文堂新光社, 東京, 2011, 95pp.
- [2] 杉原厚吉: エッシャーマジック --- だまし絵の世界を数理で読み解く. 東京大学出版会, 東京, 2011, 197pp.
- [3] 杉原厚吉: だまし絵のトリック --- 不可能立体を可能にする. 化学同人, 京都, 2010, 183pp.
- [4] 杉原厚吉: なわばりの数理モデル~ボロノイ図からの数理工学入門. 共立出版, 東京, 2009, 166pp.

[その他]

- [1] K. Sugihara: "Impossible Motion: Magnet-Like Slopes". First Prize in the Best Illusion of the Year Contest 2010 (May 10, 2010, Florida).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉原 厚吉 (SUGIHARA KOKICHI)
明治大学・大学院先端数理科学研究科・教授
研究者番号: 40144117

(3) 連携研究者

今堀慎治 (IMAHORI SHINJI)
名古屋大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 90396789