

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 16 日現在

機関番号：62615

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540091

研究課題名(和文) 外れ値存在下での離散形状モデル最適あてはめアルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Developing algorithms for fitting digitized geometric shapes to noisy data including outliers

研究代表者

杉本 晃宏 (Sugimoto, Akihiro)

国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授

研究者番号：30314256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：計測データは離散化されているにもかかわらず、それに対して連続モデルを当てはめているという従来の幾何形状あてはめ手法の本質的な問題を解決するために、本研究課題では、格子点データとして計算機内に格納された離散点集合に対して、外れ値やノイズが存在するという前提の下で、できるだけ多くの格子点データを説明する離散形状モデルをあてはめる手法を開発した。具体的には、局所探索という一貫したアプローチで、2次元離散曲線あてはめ手法、3次元離散曲面あてはめ手法、離散剛体変換あてはめ手法を開発し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Existing methods for fitting geometric shapes have a fatal drawback that data to be fitted are digitized while the shape model is continuous. In order to solve this problem, this research takes an approach where we fit a digitized geometric shape to given noisy data including outliers. We have developed methods for finding the 2D discrete polynomial curve that explains best given noisy data, for finding the 3D discrete polynomial curve that explains best given noisy data, and for finding the discrete rigid transformation that explains best for a given pair of digital images. All of our proposed methods were developed based on the same idea that formulated discrete optimization problems are tackled via the local search to find the (locally) optimal solution.

研究分野：情報学

キーワード：幾何形状 あてはめ 外れ値 コンピュータビジョン

1. 研究開始当初の背景

計算機やネットワークの高速化に伴って、表示（レンダリング）や数値解析などをはじめとした3次元モデルの応用範囲が拡大し、計算機を利用した3次元形状モデリングは、工業製品の設計にとどまらず多くの分野で利用されるようになってきている。例えば、歯科矯正や口腔外科における頭部や顎の形状モデルを用いた診断・治療支援、生体臓器や気管、血管の形状モデルを用いた生体力学シミュレーション、骨の形状モデルを用いた義肢製作、人体形状モデルを用いた人体動作解析や服飾デザインの設計、数値地形形状モデルを用いた土石流発生範囲の3次元的地形形状による把握、環境形状モデルを用いたロボットの自律走行、など枚挙にいとまがない。いずれに利用するにあたって、高品質な3次元形状モデルを提供するためには、形状モデリング過程における幾何学的処理の計算精度を保証し、3次元形状モデルとともにその信頼性を提供することが切望されている。

従来の幾何形状当てはめ手法では、計測データは離散化されているにもかかわらず、それに対して連続モデルを当てはめている。したがって、形状モデリング過程の幾何学的処理の計算精度を保証し、構築したモデルの信頼性を提供するという観点において、本質的な問題があった。

2. 研究の目的

離散形状を解析する手法として開発されている離散幾何を援用し、必要となる幾何学的処理の計算精度を保証する3次元形状モデリング手法の確立を目指す。具体的には、計測された格子点データに対して、もとの（連続）物体を計算機内に格納した時に得られる離散形状モデル、すなわち、対象物体の輪郭を表現する離散曲線や離散曲面など、を効率的に検出する算法を開発する。計測して計算機内に蓄えられた格子点データには、ノイズのため本来の格子点とは異なる格子点に蓄えられているもの（ノイズ点）、そもそも離散物体の形状を表す格子点とは関係ない格子点に蓄えられているもの（外れ値）が存在する。本研究では、格子点データにはノイズや外れ値が含まれているとし、離散幾何学的なアプローチを援用し、外れ値を排除しつつできるだけ多くの格子点データを説明する、離散形状モデル（離散曲線、離散曲面など）のパラメタを効率的に求める手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 2次元離散多項式曲線当てはめ

ノイズや外れ値を含む2次元格子点デ

ータに単一の離散多項式曲線を当てはめる問題に取り組む。 x y 平面上の離散多項式曲線を $0 \leq y - f(x) \leq w$ という形（ただし $f(x)$ は x の多項式）で表現できる場合について開発した、局所探索に基づく最適当てはめ手法を改良する。この離散曲線表現では曲線の連結性が保たれないという問題、既開発手法は計算コストがかかるという問題、を抱えているため、連結性を保つような離散多項式曲線表現を採用し、開発した局所探索手法の考え方を活かしつつ、単一の離散多項式曲線当てはめ問題に取り組む。

(2) 3次元以上のデータに対する離散多項式超曲面当てはめ

上記のアプローチを入力データの次元を3次元とした場合に適用し、離散多項式曲面を当てはめる問題に取り組む。次元が高くなると計算コストの問題がより顕在化すると想定されるので、計算の効率化を図ることに注力することになる。その際の工夫に関して、3次元固有のものと次元によらない一般的なものとの違いを意識し、4次元以上のデータに対しても適用可能な拡張性を持たせた議論を展開する。

(3) 複数の離散多項式曲線・曲面同時当てはめ

2次元格子点データに当てはめる離散形状モデルが複数の同次数の離散多項式曲線であると仮定し、計測データに対して、複数の離散多項式曲線を当てはめる手法を検討する。計測データにまず、単一の離散曲線を当てはめ、外れ値として判断されたデータに別の離散曲線を当てはめることを繰り返すという逐次的な当てはめのアプローチでは、ある段階での当てはめは、既に当てはめられた離散曲線の影響を受け、計測データ全体として複数離散曲線が最適に当てはめられていることが保証されない。そこで、複数の離散多項式曲線を同時に当てはめるといったアプローチをとり、複数離散曲線当てはめ問題全体としての最適化を図る。また、局面当てはめへの拡張も検討する。

4. 研究成果

(1) 2次元離散データへの離散多項式曲線当てはめ

本研究では、アウト라이어（外れ値）を含む離散点データが与えられた時、当てはめる多項式の次数が既知であるという前提の下で、データ点を説明する離散多項式曲線を求める手法を開発した。具体的には、離散多項式当てはめ問題を、離散多項式曲線に含まれるデータ点（イン라이어）の数を最大化する多項式係数を求める最適化問題として定式化し、効率的に多項式係数を求める手法

を開発した。提案手法で得られる解は、集合の包含関係の下で局所最適になっている。したがって、初期解をうまく選ぶことによって大局的な最適解を得ることができる。実験によって、RANSACによる従来のアプローチに比べ、入力データ中の外れ値の割合やデータ点数に関係なく、提案手法の方が効率的に最適解を求めることができることを確認した。

(2) 3次元離散データへの離散多項式曲面あてはめ

2次元離散データへの離散多項式曲線あてはめを3次元離散データへの離散多項式曲面あてはめに拡張した。局所探索の考え方を保持しつつ、次元が上がることによって生じる計算量の問題をどう抑えるかが問題になったが、必要な計算量を理論的に見積もったところ、劇的に増えるわけではなく、現状のコンピュータの性能であれば、動作に問題ないことが分かった。そこで、実験規模を大きくすることに注力し、実行上ほとんどの場合、初期解の選択やアウトライヤーの割合に依存せず、ほぼ大域的最適解が見つかること、データ点数の規模が大きくなっても許容範囲内の時間(入力データ数に比例し、最大数百秒程度)で解が求まること、を検証した(図1、2、および、表1参照)。

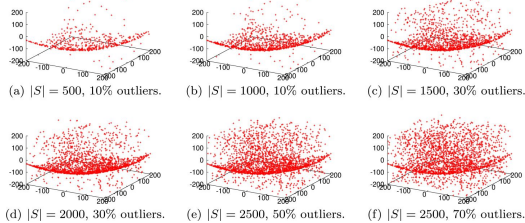


図1：入力データの例

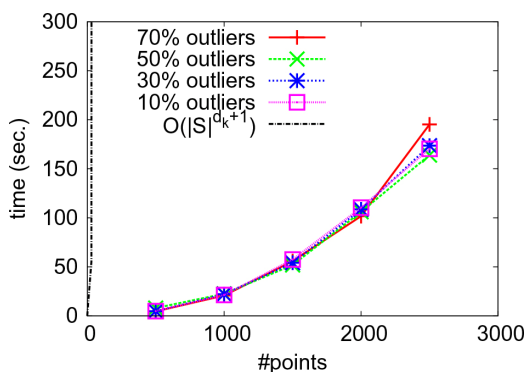


図2：入力データの変化に対する平均収束時間

(3) 離散2次元陽曲線・離散3次元陽曲面の連結性解析

曲線のような物体は現実世界においては連続的であるが、計算機内では離散化して管理する必要がある。曲線を離散化するとき一般的に必要なとされる性質として、連結性の

表1：最適解への収束の割合

seed quality	outlier ratio (%)	percentage of acquiring C_{true} (%)
6/6	10	100
	30	100
	50	100
	70	100
5/6	10	100
	30	100
	50	100
	70	100
4/6	10	100
	30	100
	50	99.7
	70	99.7
3/6	10	100
	30	100
	50	99.7
	70	98.3
2/6	10	100
	30	99.3
	50	100
	70	99.7
1/6	10	100
	30	100
	50	100
	70	99.3
0/6	10	100
	30	99.7
	50	98.6
	70	96.7

保存がある。すなわち、元の曲線が連続空間において連結であるならば、それを離散化したものも離散空間において連結であることが望ましい。

一方、離散物体の連結性は離散化の手法によって異なり得る(図3参照)。最も広く使われている離散化は形態学的離散化であり、この手法では、離散化に用いる構成要素を適切に選択することで、得られる離散物体の連結性を操作できることが知られている。その反面、形態学的離散化に要する計算コストは高い。近年、計算コストの低い解析的近似と呼ばれる手法が導入されたが、この近似によって形態学的離散化と同じ連結性が得られるかどうかは明らかでなかった。

本研究では、連続な2次元陽曲線($y=f(x)$)の形について、形態学的離散化と解析的近似の連結性の関係を明らかにした。2次元陽曲線については、解析的近似が形態学的離散化と同じ連結性を有することを理論的に示した。また、3次元陽曲面($z=g(x,y)$)についても同じ性質が成り立つことを示した。

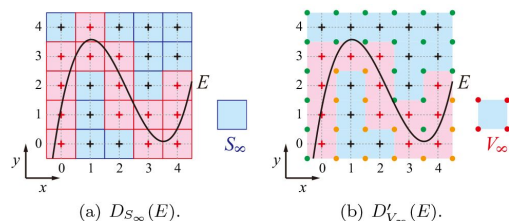


図3：離散モデルの例(離散化手法に依存)

(4) 解析的近似による離散化モデルに対する多項式曲線の同時あてはめ

入力データの個々の点に対して、離散化後にインライアーとする多項式曲線を定めるパラメタが存在する領域（実行可能領域）の境界をデータ点と離散化に用いる構成要素の端点の座標を用いて記述し、インライアー数の和を最大化するパラメタを求める問題を離散最適化問題として定式化した。そして、その問題の局所最適解を求めるアルゴリズムを検討した。実行可能領域が凸となるために入力データが満たすべき条件を見出し、その条件が満たされる場合、局所最適解を効率的に求めるアルゴリズムを考案した。入力データ集合がその条件を満たさない場合、実行可能領域が凸となる入力データの部分集合を同時にインライアーとし、残りの入力データに関しては、インライアーとして加えることができるかどうかを逐次的に判定し、加えることができる場合、新しい実行可能領域を求めるアルゴリズムを検討した。

(5) 局所探索を用いた離散剛体変換あてはめ

離散形状モデルあてはめには、離散変換（特に離散剛体変換）を施して、二つの離散形状が一致するかどうかを判定する必要がある。そのため、変換前後の形状が与えられたとき、二つの形状を一致させる離散剛体変換を効率的に計算することが求められる。変換の離散化によって得られる離散剛体変換全体の関係をグラフ構造で表現し（図4参照）そのグラフ上で、局所探索の考え方を利用して、与えられた二つの離散形状を一致させる離散剛体変換を探索するアルゴリズムを考案した。また、その有効性を実験によって検証した（図5参照）。

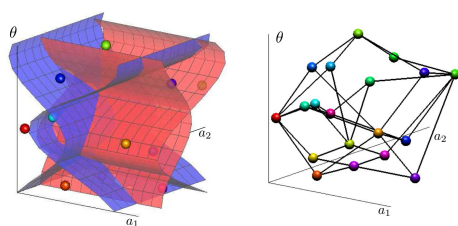


図4：剛体変換の離散化とそのグラフ表現

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 2 件)

- (1) P. Ngo, Y. Kenmochi, A. Sugimoto, H. Talbot and N. Passat: Discrete rigid registration: a local graph-search approach, *Discrete Applied Mathematics*, 査読有, 2016. 掲載決定.

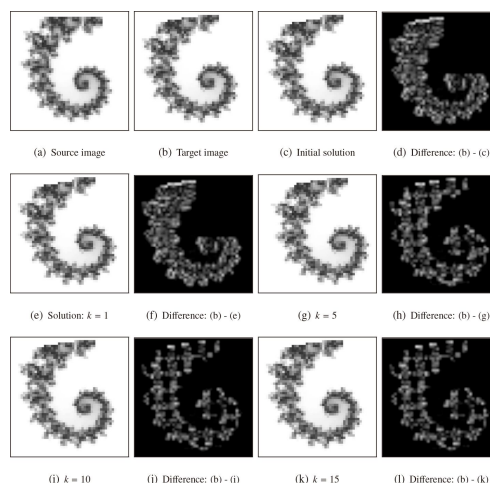


図5：離散剛体変換のあてはめ例

- (2) F. Sekiya and A. Sugimoto: Fitting discrete polynomial curve and surface to noisy data, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 査読有, Vol. 75, 2015, 135-162.
DOI: 10.1007/s10472-014-9425-7

〔学会発表〕(計 2 件)

- (1) 関弥, 杉本: 離散 2 次元陽曲線の連結性について, 第 18 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2015), 査読無, 2015.07.29, ホテル阪急エキスポパーク (大阪府).
- (2) F. Sekiya and A. Sugimoto: On connectivity of discretized 2D explicit curve, *Symposium on Mathematical Progress in Expressive Image Synthesis (MEIS2014)*, *Math-for-Industry Lecture Note Vol. 58*, 査読有, 2014.11.12, 16-25, 九州大学・西陣プラザ(福岡県).

〔図書〕(計 1 件)

- (1) F. Sekiya and A. Sugimoto: On connectivity of discretized 2D explicit curve, *Mathematical Progress in Image Synthesis II: Mathematics for Industry Vol. 18* (H. Ochiai and K. Anjyo eds.), Springer, 2015, 12 pages.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 晃宏 (SUGIMOTO AKIHIRO)
国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授
研究者番号: 30314256

(2) 海外研究協力者

Yukiko Kenmochi
CNRS researcher, University Pari-Est, France.