

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：62615

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650092

研究課題名（和文） 整数格子点上の高信頼幾何計算のためのアルゴリズムとその統一的導出

研究課題名（英文） Unified approach to exact geometric computation over integer points

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

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、「物体は格子点上で表現されていて、それに施される演算もすべて整数演算である」という現実から一切逃避しないという立場にたち、整数演算のみを用いた幾何計算アルゴリズムを体系的に導出する枠組を構築することを目指している。2次元格子点上の回転、および3次元格子点上の回転について検討し、格子点上での回転が有する性質を明らかにするとともに、整数演算のみでこれらの回転を計算する手法を開発した。また、2次元格子点上での剛体変換が有する性質を検討した。さらに、幾何モデルあてはめ問題に関して、外れ値を含む格子点データが与えられた時、データ点を説明する離散直線や離散多項式曲線を求める手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：We focused on 2D rotations on grid points computed by using only integers. We investigated rotation angles with any of which a given digital image is rotated to the same digital image. We then proposed a method for obtaining the upper and lower bounds of such angles from a given Euclidean angle and from a pair of digital images. Furthermore, we extended this method so that it can deal with 3D rotations. Namely, we studied the intersection between the 3D half-grid and the rotation plane and proposed 3D hinge angles. Then, we developed a method to sort all 3D hinge angles with integer computations alone. This investigation is extended to rigid transformations. In addition, we addressed the problem of fitting a discrete line or polynomial curve to given integer points in the presence of outliers. We then proposed a method that effectively achieves a locally optimal solution by using a local search.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 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、知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン

1. 研究開始当初の背景

現実の計算機では情報はすべて有限精度の整数値で管理されているため、3次元物体の

形状も、基本的には、整数値を用いて管理されている（有理数を用いた管理も可能であるが、これは二つの整数による管理として捉えることができる）。したがって、計算機内で3次元物体を幾何学的に操作しようとした

とき、実際には、物体を表現している整数格子点(整数点)に対して幾何計算が適用される。幾何学的な操作は、本来、実数を扱う連続の世界で定式化されているにもかかわらず、それを実現する際には、整数格子点に対して幾何計算が実行されているというのが現状である。したがって、その計算結果には、必ず離散化誤差や丸め誤差が含まれてしまう。特に、幾何操作が何度も繰り返して適用されたときには、このような誤差の蓄積は見逃せぬものとなる。すなわち、こうした誤差が、3次元物体がもともと有していた幾何学的な構造や性質を壊してしまい、幾何計算後の結果はもはや信頼できないものとなる。たとえば、1点で交わる3直線は、幾何計算後には1点で交わらなくなる。同一平面上に存在する点群は、幾何計算後には同一平面上には存在しなくなる。これは、コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、デジタル画像解析などの分野で深刻な問題として捉えられており、その解決が切望されている。

2. 研究の目的

整数演算のみを用いた幾何計算アルゴリズムを体系的に導出する枠組の構築を目的とする。この枠組で作られた幾何計算アルゴリズムを用いれば、3次元物体に幾何学的な操作が何度適用されたとしても、その物体の幾何学的な構造や性質は保持される。したがって、3次元物体に対して自由に幾何学的な操作を施すことができ、しかも、その計算結果は正確で信頼でき、もはや誤差に悩まされることはなくなる。

3. 研究の方法

(1) 2次元格子点、3次元格子点の回転の統一的定式化

系統的に幾何計算アルゴリズムを導出するためには、幾何演算を次元に依存せず統一的な記述で表現することが必須である。しかし、

値が無理数となり得る正弦や余弦を整数演算では用いることはできず、2次元格子点の回転や3次元格子点の回転を通常のように行列表記で記述することはできない。そこで、2次元格子点の回転、3次元格子点の回転を別の形で統一的に記述することを試みる。これによって、格子点上の回転(離散回転)に対する理解がより深まることが期待される。ここでは、回転後の離散化に依存して発生する、離散回転前後での1対1対応、回転の繰返しによる対応の保持や消滅について注意深く考察する。また、隣接する格子点の境界に対応する回転角度 *hinge angle* との関係について議論を展開する。

(2) 2次元回転、3次元回転に対する整数演算法

表現された2次元格子点の回転、3次元格子点の回転を整数演算のみで実現しなければならない。そうでなければ、整数値を入力としてもその演算結果の整数性が保持されないからである。ここでは、2次元格子点の回転を考えたとき、その回転角の範囲は、回転前の格子点の座標、回転後の格子点の *x* 座標の3つの整数値によって整数演算のみで計算可能であること、3次元の場合は5つの整数値による整数演算のみで計算可能であることを利用し、これを拡張する形でその演算法を開発する。

(3) 2次元データに対する離散幾何モデルあてはめ

もっとも単純な場合として、ノイズや外れ値を含む2次元格子データに離散直線や離散曲線を当てはめる問題に取り組む。当てはめる離散幾何モデルの最適な幅をデータから決定する手法の開発が必要である。ひとたび幅を決定すると、同じ幅をもつ離散直線群のうち、外れ値でない点になるべく多く含むという指標と当てはめられた離散直線からのずれがなるべく小さくなるという指標の下で、最適な離散直線を見つける必要がある。この問題を最適化問題として定式化し、その最適解を効率的に求める手法を開発する。ま

た、双対性を利用した定式化についても検討を加える。

4. 研究成果

(1) 整数計算による2次元格子点上の離散回転

デジタル画像上での2次元回転は、画像マッチングや画像の位置合わせなどにおいて重要な役割を演じる。本研究では、回転前後のデジタル画像対が与えられたとき、整数計算のみを用いてその2次元回転を推定する手法を開発した。連続画像の場合とは異なり、デジタル画像の場合、回転角度が異なってもある範囲内にある角度であれば、デジタル画像に回転を施した結果、同一のデジタル画像が得られる。これは、回転後に行う画像の離散化に起因している。したがって、同一のデジタル画像が得られる回転角度の上限・下限を求めることが重要となる。提案手法では、いくつかの対応画素対が集合で与えられたとき、集合内の対応画素対すべてと整合する回転角度の上限・下限を効率よく求めることができる。しかもそこで要する計算を全て整数計算で実現しているため、得られた結果に誤差は一切含まれない。言い換えれば、提案手法によって、デジタル画像上での2次元離散回転を計算誤差無しに効率的に求めることが可能となっている。

(2) 2次元格子点上の離散回転推定手法の拡張

回転前後のデジタル画像対から整数計算のみを用いてその2次元離散回転を推定する上記手法では、画素の離散化誤差は存在しないことを前提としていた。そこで、この前提が成り立たない場合にでも適用できるように手法を拡張した。具体的には、離散化誤差が存在する場合にも画素対応から整数計算のみで2次元離散回転の上限・下限を効率的に推定することができるように手法を拡張した。さらに、与えられた画素対が必ずしも正しい対応でない場合でも、入力画素対と整

合する離散回転の上限・下限を効率的に求めることができるように手法を改良した。これらの改良によって、デジタルカメラで撮影した実際の画像に対して提案手法を適用することができるようになった(図1、2、3)。

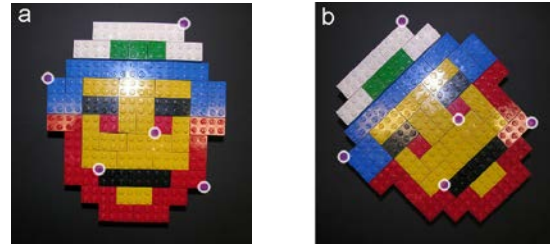


図1：回転前の画像 図2：回転後の画像

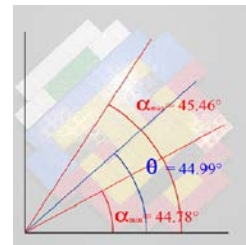
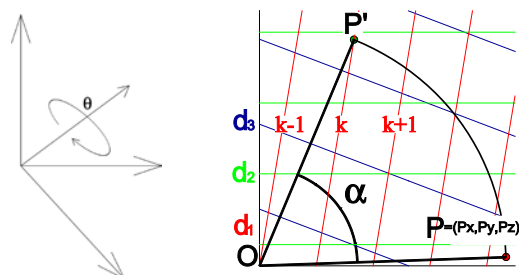


図3：改良手法によって推定された回転角(青が真値、赤が推定された上限、下限)

(3) 3次元格子点の離散回転推定手法

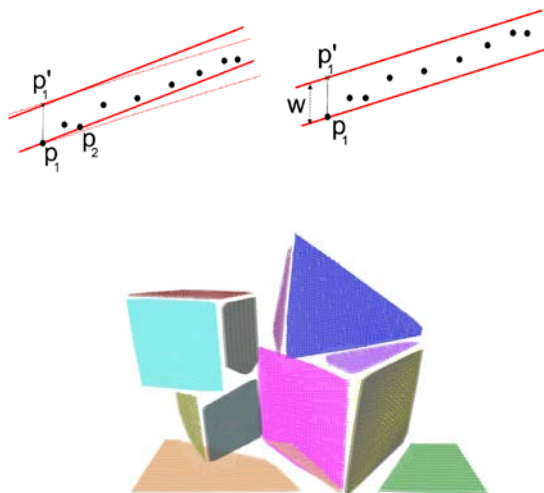
3次元回転は、3次元画像のマッチングや位置合わせなどにおいて重要な役割を演じる。本研究では、2次元離散回転推定手法を発展させ、与えられた3次元格子点对と整合する3次元回転角度の上限・下限を誤差なしで正確に求めるアルゴリズムを開発した。



既開発した2次元離散回転推定手法を拡張し、3次元離散回転を扱えるようにした。具体的には、回転軸と回転角度で3次元回転

を捉え、回転すべき格子点がる回転平面と3次元格子との交わりを考えることで、3次元離散回転を5個の整数値で表現できることを示した。また、異なる3次元回転をこの5個の整数値を用いた整数計算のみによって比較することができることを示した。そして、3次元格子点对応が与えられたとき、整数計算のみでその対応を実現する3次元回転の上・下限を効率的に推定する手法を開発した。

(4) 離散データ点への直線・平面あてはめ
直線や平面を離散的に計測した2次元点や3次元点から元の直線や平面を推定することはデジタル画像を扱う上でのもっとも基本的な問題の一つである。本研究では、この問題を混合整数計画問題として定式化し、離散化誤差を考慮した最適な直線当てはめ／平面当てはめの手法を開発した。ここでは、計測点にはアウトライヤーが存在するという前提で、計測点がインライヤーかアウトライヤーかを表す離散変数と当てはめる直線／平面までの誤差を表す連続変数を導入して問題を定式化している。開発した手法は、離散幾何の手法とコンピュータビジョンの手法を融合することによって、外れ値が存在するという前提で、最も多くの離散計測点が支持する直線／平面を効率的に求めることができる。実画像を用いた実験でもその有効性が確認されている。



(5) 離散データへの離散多項式曲線あてはめ

本研究では、アウトライヤー（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（インライヤー）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。ランダムに選んだインライヤーによって多項式係数を決定する手続きを何度も繰り返し最終的な解を求めるRANSACによる従来のアプローチでは、得られた解の性質に何の保証もないが、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（図4、Table 1、Table 2参照）。

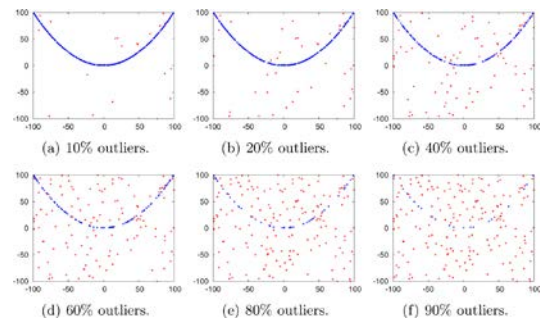


図4：入力データの例

Table 1. Number of samplings ($\times 10^3$) required for achieving C_{\max} ($k = 2$).

| ratio of outliers (%) | S | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 |
|-----------------------|------------|-----|------|-------|-------|--------|
| 25 | our method | 0.8 | 1.6 | 2.4 | 3.6 | 5.0 |
| | RANSAC | 2.0 | 16.5 | 46.1 | 101.7 | 211.2 |
| 50 | our method | 0.8 | 1.4 | 2.4 | 3.2 | 5.4 |
| | RANSAC | 1.7 | 14.9 | 46.6 | 113.1 | 223.4 |
| 75 | our method | 1.7 | 2.4 | 4.3 | 6.0 | 8.8 |
| | RANSAC | 6.1 | 64.4 | 256.1 | 560.1 | 1062.0 |

Table 2. Number of samplings ($\times 10^3$) under different outlier ratios ($k = 2$).

| ratio of outliers (%) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| our method | 4.7 | 4.6 | 4.2 | 4.6 | 4.6 | 4.4 | 4.6 | 4.3 | 7.0 |
| RANSAC | 76.7 | 80.1 | 75.9 | 87.7 | 81.2 | 74.9 | 75.8 | 72.0 | 77.4 |

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 3 件)

- (1) D. Thomas and A. Sugimoto: Range Image Registration using a Photometric Metric under Unknown Lighting, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 査読有, 2013, 掲載決定.
DOI: 10.1109/TPAMI.2013.21
- (2) R. Zrou, Y. Kenmochi, H. Talbot, L. Buzer, Y. Hamam, I. Shimizu and A. Sugimoto: Optimal Consensus Set for Digital Line and Plane Fitting, International Journal of Imaging Systems and Technology, 査読有, Vol. 21, 2011, 45-57.
DOI: 10.1002/ima.20269
- (3) Y. Thibault, A. Sugimoto and Y. Kenmochi: 3D Discrete Rotations using Hinge Angles, Theoretical Computer Sciences, 査読有, Vol. 412, 2011, 1378-1391.
DOI: 10.1016/j.tcs.2010.10.031

[学会発表] (計 7 件)

- (1) M.-S. Phan, Y. Kenmochi, A. Sugimoto, H. Talbot, E. Andres and R. Zrou: Efficient Robust Digital Annulus Fitting with Bounded Error, Proc. of International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI2013), LNCS Vol. 7749, 査読有, 2013.03.21, 253-264, セビリア大学(スペイン).
- (2) F. Sekiya and A. Sugimoto: Discrete Polynomial Curve Fitting to Noisy Data, Proc. of International Workshop on Combinatorial Image Analysis (IWCIA2012), LNCS Vol. 7655, 査読有, 2012.11.29, 59-74, オースチン大学(USA). (最優秀学生論文賞)
- (3) G. Largeteau-Skapin, R. Zrou, E. Andres, A. Sugimoto and Y. Kenmochi: Optimal Consensus Set and Preimage of 4-Connected Circles in a Noisy Environment, Proc. of IAPR International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), 査読有, 2012.11.15, 3774-3777, つくば国際会議場(茨城県).
- (4) D. Thomas, Y. Matsushita and A. Sugimoto: Robust Simultaneous 3D Registration via Rank Minimization, Proc. of Symposium on 3D Imaging,

Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT2012), 査読有, 2012.10.13, 33-40, スイス連邦工科大学(スイス).

- (5) 関弥史紀, 杉本晃宏, 井宮淳: 離散データに対する離散多項式曲線あてはめ, 第182回情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 査読なし, 2012.05.24, SIG-CVIM-182, 中京大学(愛知県). (卒論セッション優秀賞)
- (6) D. Thomas and A. Sugimoto: 光学解析に基づく距離画像の位置合せ, 第182回情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 査読なし, 2012.05.24, SIG-CVIM-182, 中京大学(愛知県).
- (7) D. Thomas and A. Sugimoto: Illumination-Free Photometric Metric for Range Image Registration, Proc. of IEEE Workshop on Application of Computer Vision (WACV2012), 査読有, 2012.01.11, 97-104, コロラド大学(USA).

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 : 3 0 3 1 4 2 5 6

(2) 海外研究協力者

Eric Andres

University Professor in Computer Science, University of Poitiers, France.

Yukiko Kenmochi

CNRS researcher, IGM, University Marne la Vallee, France.