

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330212

研究課題名(和文)変形の伴う3次元形状間の全自動アラインメント

研究課題名(英文)Localization and Alignment of Non-rigid Organs by Exhaustive Search of Position, Orientation, Scale and Deformation Parameters

研究代表者

徐 剛 (Xu, Gang)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：90226374

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：医用ボリュームデータにおける肝臓を主成分線形変形(8パラメータ)と位置姿勢スケール(7パラメータ)の計15パラメータに対して全自動で位置決めすることを問題として設定した。全探索というアルゴリズムを考案し、ソフトウェア実装、CUDAによる並列処理による高速化を行った結果、当初設定した問題を完全に解くことができた。従来、ボリュームデータに対して人手による切り出しを行っているが、約6時間かかっている作業であるのに対して、本システムでは、約90秒の時間で完成する。GPU以外に高速化を工夫したアルゴリズムは、ピラミッド探索、回転の均等サンプリング、ディスタンスフィールドの事前作成、などである。

研究成果の概要(英文)：This research shows that against the intuition of impossibility of exhaustive search of a relatively large number of parameters, by a number of techniques to reduce computational cost, we succeeded in localization and alignment of livers in MR volume data by exhaustive search of 15 parameters including 3 for position, 3 for orientation, 1 for scale, and 8 for deformation. Deformation is represented as a linear combination of principal components of a set of some 50 aligned 3D sample models. Using GPU for acceleration, we were able to find livers without any human intervention at a speed of 1.5 minutes, which is now manually done by human operators at a speed of half a day.

研究分野：三次元画像認識

キーワード：画像認識 医用画像処理 3次元 アラインメント 変形 ボリュームデータ CT MRI

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は変形のない(剛体)3次元形状間の全自動アラインメントについて全探索という戦略を提唱し、産業ロボットビジョン等で十分に安定性を持った結果を実現し実用化・事業化に至った。一方、剛体でない一般的物体認識や医用画像処理などにおいては、変形の伴う3次元形状間のアラインメントが依然課題として残っている。そこで、変形の伴う3次元形状間のアラインメントに、全探索という戦略を拡張する。

## 2. 研究の目的

3次元ビジョンやパターン認識の多くの問題は、アラインメントの問題に帰着できる。具体的には、事前に定義された物体の3次元モデルが、今注目しているシーンに存在するかどうか、存在するならば、どこにあり、どの姿勢であるかを求める問題である。

物体の3次元モデルが既知であり、変形がなければ、観測されるデータとモデルとの間で存在する違いは、その3次元モデルの3次元位置(例えばX,Y,Z)と3次元姿勢(例えば3つの角度、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ で表される)のみである。言い換えれば、3次元モデルに対してX,Y,Z, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の変換を施せば、観測データと同じものが得られる。このように理解すれば、物体認識の問題はX,Y,Z, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ の6次元パラメータ空間で変換を表す点を探索する問題になる。この6次元空間の1点を見つけることができれば、モデルと観測データとの間の変換=アラインメントが可能となる。

従来、このような探索問題を様々な近似手法で解いてきたが、ロバスト性は保証されず、実用に必要な安定性が得られない問題があった。そこで、申請者らは全探索という戦略を提唱し、産業ロボットビジョンにおける3次元物体認識とピンピッキングという問題を解決し、世界初の本格的3次元ロボットビジョンセンサとして実用化・事業化に成功した。

全探索とは、6次元の探索空間を離散化し、全てのボクセルに対して解であるか否かを調べるというものである。解である可能性があれば、そのボクセルの範囲において更に解の精度を連続的に高める。これは一見気が遠くなるような探索量であり、事実、莫大の計算量となるが、解の漏れを無くすることができるため、実用に必要な安定性を確保することができる。幸い、ムーアの法則のお蔭で、計算機のパワーが指数的に増えてきたため、6次元空間の探索問題も解けるようになりつつある。

変形のない3次元形状間のアラインメントはこのように解決されたが、変形の伴う3次元形状間のアラインメントは依然未解決のま

までである。変形の伴う3次元形状間のアラインメントの問題は多くの分野で存在する。具体的には、例えば、医用画像処理である。CTなどの普及により、臓器の3次元形状がボリュームデータとして得られるようになってきた。同じ臓器でも、個人差があり、サイズや形は万人全く同じではない。しかし、大まかな形状は似ている。また、一般的3次元物体認識においては、顔は皆似ているが、サイズや形が完全に同じではなく、個人差がある。このような変形(サイズを含む)の伴う3次元形状間のアラインメントが、アトラスの構築や病気の発見など多くのアプリケーションに必要なため、この課題の解決は意義が大きい。

アラインメントに関する従来の研究では、主な方法は2つあった。1つは仮説検証法であった。特徴的な局所の対応づけによって、グローバルな変換に関する何らかの仮説を立てる。そして、その仮説に対して、形状全体を用いて評価を行い、その仮説の真否を確かめる、というものである。この方法は、正解となる仮説が常に生成されることが保証されれば、探索は早く終わる特徴を持つ。しかし、観測にノイズがある場合に、そのような仮説が常に生成できる保証はないため、正解が得られたり、得られなかったりし、安定性に欠ける、という欠点を持つ。もう一つの方法は、不変量を探すというものであった。形状を表し、かつ、その形状の位置姿勢に依らない量を見つけることができれば、その量の比較だけで対応が可能となるが、3次元形状に関してはそのような量が見つからない。

ノイズを含むデータという前提下で安定性の問題を根本的に解決するのは全探索しかない。しかし、計算量が莫大となるため、従来は避けられてきた。2次元物体認識の場合、位置(x,y)と姿勢( $\theta$ )の3自由度であり、仮にどの自由度も100点でサンプリングするとすれば、100の3乗=1メガとなる。しかし、3次元物体認識の場合、位置(x,y,z)と姿勢( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )の6自由度となり、仮にどの自由度も100点でサンプリングするとすれば、100の6乗=1テラの探索空間となる。ムーアの法則でコンピュータが早くなったとはいえ、このオーダーの探索を短時間で完成させることは簡単ではなく、この戦略の採用が敬遠されていた。

3次元形状の変形は、上記の位置(3パラメータ)と姿勢(3パラメータ)以外に、次の表現で表すことが可能である。(1)全体のスケーリング、または、(2)形状の3つの軸に沿う異なるスケーリング、(3)スケーリングで表せない変形。

もし、1つのスケーリングで十分である場合、探索空間は7次元である。もし3つのスケーリングが必要である場合、探索空間は9次元となる。スケーリングで表せない変形を

パラメータで表現できないため、探索の対象ではないが、類似形状である以上、変形後のモデルと入力形状との差(距離)が小さいはずである。もし、これらの変形を施しても、変形後のモデルと入力形状との差が小さくならないならば、類似形状とはそもそもいえない。

### 3. 研究の方法

(1)ピラミッドの使用。いきなり最高解像度で探索を行おうとすると、どうしても探索量が増える。そのため、異なる解像度のデータを作成し、まず低い解像度で探索を行い、見つけた解に対して(のみ)解像度を高めながら探索を続けていく。ただし、ピラミッドを降りていく際に真の解を漏らさずに確実に辿っていくことが重要である。

(2)並列計算。GPU、SIMD、マルチコア、複数台PCの活用をすることにより、計算時間を数百や数千分の1に短縮することができる。下記に述べるディスタンスフィールドは膨大なメモリを使用するが、GPUに載せることができるため、複数の解候補の評価を並列に行うことが可能である。また、一部の計算はマルチコアのCPUで実施することが可能である。自由度が8,9個と増えていったときには、複数台のPCを使用する必要が出てくる。

(3)ディスタンスフィールド。膨大な量の解候補を評価する際に、予め作成しておいたディスタンスフィールドを使用することになり、評価の計算量を最小限に減らすことができる。ディスタンスフィールドとは、ボクセル空間の各ボクセルについて参照元となる3次元形状表面までの最小距離を予め計算しておいたものである。マッチング対象の3次元形状に対して上記に述べた変換を施しながら、一致度合を評価する際には、変換後の各点が参照元となる3次元形状表面までの最小距離をその都度計算する必要がなくなり、ディスタンスフィールドに登録されている値を取り出すだけで済むため、高速である。

(4)平行移動とスケールだけでなく3次元空間の回転も等間隔で均一にサンプリングし、探索空間を減らす。平行移動とスケールは線形なため、等間隔で均一なサンプリングは比較的容易であるが、3次元空間の回転を等間隔で均一にサンプリングすることは実にややこしい問題である。回転の表現によく用いられるオイラー角はこの条件を満たさない。緯度経度の例では、南極と北極はどうしても密度が高い。そこで、まず球面を正20面体で近似する。そして、それぞれの面(正3角形)に対して、更に正3角形で分割していくようにしていけば、球面を等分割できる。それぞれの辺の長さを回転角Aとして換算する。そして、最後に残った各頂点に球の中心から向かうベクトルを軸とす

る、等間隔の回転Aを行えば、均等の回転を表現することができる。そのときの分解能は回転角Aである。

### 4. 研究成果

医用ボリュームデータにおける肝臓を主成分線形変形(8パラメータ)と位置姿勢スケール(7パラメータ)の計15パラメータに対して全自動で位置決めすることを問題として設定した。全探索というアルゴリズムを考案し、ソフトウェア実装、CUDAによる並列処理による高速化を行った結果、当初設定した問題を完全に解くことができた。評価実験では、52例のボリュームデータから、3例の肝硬変などの特異な3次元形状を持つ3例以外は全て、全自動で肝臓の位置決め成功した。従来、ボリュームデータに対して人手による切り出しを行ってきたが、約6時間かかっている作業であるのに対して、本システムでは、約90秒の時間で完成する。GPUによる高速化をしない場合に15分かかった処理は、GPUによる高速化を施すことにより、1分半程度に短縮できた。GPU以外に高速化を工夫したアルゴリズムは、ピラミッド探索、回転の均等サンプリング、ディスタンスフィールドの事前作成、などである。

肝臓の位置決めを正確に行ったあと、主成分分析で表現される3次元形状と実際の肝臓の3次元形状との間に僅かな差が残る問題に対して、Free-Form Deformationモデルを用いてその差を縮める処理を行い、位置決めだけではなく、切り出しにも成功した。

本研究の成果は肝臓の全自動切り出しだけでなく、主成分線形モデルで表現できないような3次元形状を結果として判定することもでき、このような3次元形状は多くの場合に肝硬変などの特異形状であることから、病気の自動診断にも使える可能性がある。

国際会議などで発表を行った。他の研究室にて、病院にて実使用できるシステムの開発も進められている。

本研究は、コンピュータのプロセッサ数の増加により、有効であることが分かっているながらも莫大な計算量ゆえに避ける傾向にある全探索のような手法も実現可能であることを示した。

### 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10件)

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu,  
Co-occurrence Context of the  
data-driven Quantized Local Ternary  
Patterns for Visual Recognition, IPSJ  
Transactions on Computer Vision and

Applications, Vol 9, 2017, pp. 1-10, DOI 10.1186/s41074-017-0017-4, 査読有

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, Integration of spatial and orientation contexts in local ternary patterns for HEP-2 cell classification, Pattern Recognition Letters, Volume 82, Part 1, Pages 23-27, 15 October 2016, 査読有

Chunhua Dong, Yen-wei Chen, Amir Hossein Foruzan, Lanfen Lin, Xian-hua Han, Tomoko Tateyama, Xing Wu, Gang Xu, Huiyan Jiang, "Segmentation of liver and spleen based on computational anatomy models", Computers in Biology and Medicine, Vol.67, 1 December 2015, Pages 146 - 160, doi:10.1016/j.combiomed.2015.10.07, 査読有

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, "High-order Statistics of Weber Local Descriptors for Image Representation", IEEE Transaction on Cybernetics, vol. 45, Issue: 99. NO. 6: 1180-1193, 2015, 査読有

Chunhua Dong, Yen-Wei Chen, Toshihito Seki, Ryosuke Inoguchi, Chen-Lun Lin and Xian-Hua Han, "Non-rigid image registration with anatomical structure constraint for assessing locoregional therapy of hepatocellular carcinoma," Computerized Medical Imaging and Graphics, Vol.45, pp.75-83, 2015, 査読有

岩本裕太郎, 韓先花, 椎野顕彦, 陳延偉, 「スパース表現と自己相似性を用いた三次元医用画像の超解像処理」, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J98-D, pp.1312-1324, 2015, 査読有

Titinunt Kitrungrotsakul, Chunhua Dong, Tomoko Tateyama, Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen, "Interactive Segmentation and Visualization System for Medical Images on Mobile Devices," J. Adv. Simulat. Sci Eng., Vol.2, No.1, pp.96-107, 2015, 査読有

Xian-Hua Han, Jian Wang, Gang Xu, Yen-Wei Chen: "High-order Statistics of Micro-Texton for HEP-2 Staining Pattern Classification," IEEE Transaction on Biomedical Engineering,

Vol.61, No.8, pp.2223-2234, 2014, Impact factor: 2.348, 査読有, DOI: 10.1109/TBME.2014.2320294

JunPing Deng, Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen, Gang Xu, Yoshinobu Sato, Masatoshi Hori, Noriyuki Tomiyama, "Sparse and Low-Rank Matrix Decomposition for Local Morphological Analysis to Diagnose Cirrhosis", IEICE transactions on information and systems, vol. E97-D, No.12, pp. 3210-3221, 2014, 査読有, DOI: 10.1587/transinf.2014EDP7180

[学会発表](計 11 件)

Masahiro Isobe, Shota Niga, Kei Ito, Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, "Automatic Alignment of Deformable Organs in Medical Volume Data", The 11th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2015), JR 博多シティ, Fukuoka Japan, Nov.26.2015

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen, Gang Xu, 'Co-occurrence Context of the data-driven Quantized Local Ternary Patterns for Visual Recognition', The 3rd IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR2015), Kuala Lumpur, Malaysia (6 Nov. 2015), 査読有

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen, and Gang Xu, "HEP-2 Staining Pattern Recognition Using Stacked Fisher Network for Encoding Weber Local Descriptor", 6th International Workshop on Machine Learning in Medical Imaging (MLMI 2015), Oct. 5, 2015, Munich German, 査読有

Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen, Gang Xu, "Cooccurrence Statistics of Local Ternary Patterns for HEP-2 Cell Classification", Innovation in Medicine and Healthcare 2015, pp.205-213, 立命館大学朱雀キャンパス, Kyoto, Japan, Sept.11.2015, 査読有

Titinunt Kitrungrotsakul, Xian-Hua Han, and Yen-Wei Chen, "Liver Segmentation Using Superpixel-Based Graph Cuts and Regions of Shape Constraints," IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2015), Quebec, Canada, Sep.30, 2015 (388-QATc-141, Oral Presentation)

Qiaochu Zhao, Xian-Hua Han, Yan-Wei Chen, "A Robust Registration Method using Huber ICP and Low Rank and Sparse Decomposition," Asia-Pacific Signal and Information Processing Association annual summit and conference (APSIPA ASC2015), Hongkong China, Dec.16, 2015.

Misae Nakatsu, Xian-Hua Han, Ryosuke Kimura and Yen-Wei Chen, "Discriminant Statistical Analysis of Local Facial Geometrical Regions," 3rd Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR2015), Kuala Lumpur, Malaysia, Nov.5, 2015

Xian-Hua Han, Yukako Tohsato, Koji Kyoda, Shuichi Onami, Ikuko Nishikawa and Yen-Wei Chen, "Nuclear Detection in 4D Microscope Images of Developing Embryo Using Enhanced Probability Map of Top-ranked Intensity-ordered Descriptors," 3rd Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR2015), Kuala Lumpur, Malaysia, Nov.5, 2015 (Oral Presentation).

Shota Niga, Kei Ito, Masahiro Isobe, Xian-Hua Han, Yen-Wei Chen and Gang Xu, "Automatic Localization of Deformable Organs in Medical Volume Data by Exhaustive Search", The 10th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2014), Beijing, China, Oct.17 2014.

Xianhua HAN, Yen-Wei CHEN, Gang XU, "Data-Driven Model of Weber Local Descriptors for Visual Recognition", 第 17 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), 2014.7.31, 岡山コンベンションセンター (岡山県)

Xianhua HAN, Yen-Wei CHEN, Gang XU: "Bayesian-based Saliency Model for Liver Tumor Enhancement," Smart Digital Futures 2014, 2014.6.18, 2014, Chania, Greece

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

徐 剛 ( Xu Gang )  
立命館大学・情報理工学部・教授  
研究者番号：90226374

### (2) 研究分担者

陳 延偉 ( Yen-Wei Chen )  
立命館大学・情報理工学部・教授  
研究者番号：60236841

韓 先花 ( Xian-Hua Han )  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・人工知能研究センター・主任研究員  
研究者番号：60469195