

氏 名	サワ ダ ヨシ ヒデ 澤 田 好 秀
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博第865号
学位授与の日付	平成25年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学 位 論 文 題 目	統計臓器モデルの医用画像に対する頑健で正確な位置合わせ (Robust and Accurate Registration of Statistical Organ Models to Medical Images)
論文審査委員	主 査 教 授 本 谷 秀 堅 教 授 岩 田 彰 准教授 竹 内 一 郎

## 論文内容の要旨

本論文は、医用画像中の臓器表面と臓器モデルとの高精度な位置合わせ(レジストレーション)のための統計的枠組みに関して論じたものである。医用画像中の解剖構造の自動認識は、診断や治療立案支援にとって必須の機能であり、臓器モデルを医用画像に対して位置合わせすることにより実現される。本論文では、臓器モデルとして、臓器表面を点群で記述する point distribution model (PDM)を採用する。その上で、各臓器形状の多様性を表現する statistical shape model (SSM)について論ずる。具体的には、以下の2項目について考察し、それぞれの考察に基づき位置合わせの精度を向上させる手法を提案する。

(1)SSM のグラフィカルモデル表現と推論法

(2)隣接臓器や臓器表面上の腫瘍に対して頑健な SSM

(1)は SSM の表現と推論に関する議論である。従来の線形な SSM の表現方法には、部分空間表現と測地距離に基づいたグラフィカルモデル表現の二つがある。本論文では、これら従来のモデルの問題点を指摘する。具体的には、部分空間表現によるモデルは過学習の影響を受けること、また測地距離に基づくグラフィカルモデル表現は点間の条件付き独立性を統計的に正しく推定していないことを指摘する。一方本論文では、正則化推定によって過学習を回避しつつ、統計的に正しいモデル構造の推定を行う。これにより、位置合わせ

の精度を向上させることが可能になる。また、グラフィカルモデル上での確率推論法の違いが位置合わせの精度に影響を与えることも併せて指摘する。

(2)は SSM の外れ値に対する頑健化に関する議論である。一般に、医用画像を対象とした位置合わせでは、SSM を用いても隣接臓器や腫瘍などによる臓器表面の変化を適切に表現することは困難である。これらの領域を自動的に無視することができれば、より高精度な位置合わせの実現が期待できる。本論文では、このような領域をモデルでは表現できない外れ値と置く。そして、臓器表面を複数のクラスタに分割し、各クラスタの表面積における外れ値領域の疎性を仮定することで、外れ値を自動的に検知・無視する。その後、クラスタ間のグラフィカルモデルを構築することで、クラスタ間の関係も考慮しつつ各点の位置の推定を行う。本論文では、提案手法を用いることで、位置合わせの精度が実際に向上することを指摘する。また、(1)で使用した SSM との関連性についても併せて指摘する。

本論文では、実臨床画像に基づいた性能評価実験を行った。そして、上述した内容に関して定量評価を行い、その結果を考察する。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、医用画像中の臓器領域を抽出することを目的として、入力された画像に対して、対象臓器表面の統計モデルを頑健かつ正確に位置合わせする、新たな手法を提案するものである。臓器表面モデルの画像に対する位置合わせは、医用画像診断支援システムに不可欠であり、数多くの研究が精力的になされてきた。これら従来法は、臨床応用上必要な、次の事柄に対して十分な性能を実現できていなかった。(1) 臓器表面に病変が存在したり、対象臓器が隣接臓器と接触したりする場合、臓器表面の形状が統計モデルの表現から逸脱するため、位置合わせの精度が低下する。(2) 臓器位置合わせにおいては、臓器表面の位置が推定されるが、その推定結果の確からしさが不明である場合が多い。これら二つの事柄は、臓器位置合わせ法を利用する医用画像診断システムの信頼性を低下させる要因であり、解決が望まれていた。本研究では、まず後者に関連して、推定結果の確からしさを定量自己評価する手法を実現した。すなわち、臓器表面を点群で表現した上で、各点座標を確率変数とみなすグラフィカルモデルにより、臓器形状の統計を表現した。そして、臓器位置合わせの問題を、グラフィカルモデル上での、各点座標の周辺事後分布の推定問題へと帰着した。このことにより、モデルを画像へと単に位置合わせするだけではなく、その結果の確からしさを、臓器の部位ごとに定量自己評価する手法を実現した。また、このグラフィカルモデルの構造に依存して推定精度が変化することを見だし、学習データ数が少ない場合でも、従来法よりも高性能なモデルを構築する手法を実現した。これら手法に関する記述は、本論文の第2章になされている。次に、前者に関連して、病変部位など統計モデルでは記述できない対象を自動的に検知し、除外しつつ位置合わせを実行する手法を実現した。位置合わせ法の多くは、モデル曲面と画像中のターゲットとのずれが、正規分布に従うと仮定する。この仮定を採用するとき、ズレの二乗和を最小化することにより尤度を最大化することができる。ただし、このような最小二乗法は、正規分布に従わない外れ値がデータに含まれるとき、推定精度が低下する。このため、従来の位置合わせ法は、病変部など外れ値が画像中に含まれるときに、高精度に位置合わせすることができなかった。本研究では、位置合わせの際に最小化するコスト関数に、外れ値の疎性に基づく正則化項を導入した。臓器表面の病変部や、隣接臓器との接触領域の面積は、多くの場合、臓器全体の面積と比べると小さい。この事実を踏まえ、疎性に基づく正則化項を導入することにより、外れ値領域を同定しつつ、外れ値領域の外でのみ二乗誤差を積算しつつ位置合わせをおこなう手法を実現した。また、外れ値に対する頑健性をより強固に実現するために、統計モデルを階層化し、臓器形状の統計を、部分形状と、部分形状間の関係とに分けて表現する手法を提案した。このことにより、学習データ数が少ない場合でも、頑健で高精度な位置合わせが可能な統計モデルを実現できた。この手法に関する記述は、本論文の第3章になされている。以上の成果は学術論文3編、査読有りの国際会議5編などで発表され、高い評価を受けている。以上の事柄に基づき、慎重な審査の結果、本論文は博士（工学）に値すると判断する。