

審査の結果の要旨

氏名 齋藤 季

現在、医療の分野において X 線 CT 画像撮影をはじめとする 3 次元計測技術の発展により、患者の体内情報を高精細に取得できるようになっている。このような 3 次元の高精細な情報は高精度な手術に貢献してきた。一方で、手術室の制限などによって手術中に得られる画像は断片的な画像に限られ、また、患者の被曝量や医療従事者の日常の被曝量を抑える必要がある。このような背景から、手術中の断片的な情報と手術前に取得可能な高精細な情報を統合することで術中に患者の 3 次元情報を復元し利用する研究が行われている。

この研究への取り組みとして、術前術中で変形のない剛体を仮定した一つの臓器への対応から始まり、関節を挟んだ複数の骨や、臓器自体が変形するものに対する対応が検討されてきた。本研究では、さらに、従来では成し得なかった臓器形状がトポロジカルに変化する事例への対応を課題とし、それを解決する手法を提案・実装し、実現可能であることを示した。

第 1 章では、既存の手術支援システムを紹介するとともに従来の 3 次元情報復元手法である X 線画像と統計形状モデルを用いた 2-D/3-D レジストレーションの限界について説明し、本研究の必要性を述べている。本研究では提案する手法の適用対象として特に形状のトポロジーが変化する骨の破断すなわち骨折症例を対象とした。

第 2 章では、患者の骨の 3 次元情報の復元に用いる統計形状モデルの高精度化手法を提案している。統計形状モデルの作成には同一種類の骨間において形状の対応関係を取得する必要がある。本研究では形状の対応関係取得に使用する局所特徴量として局所曲率の分布を使用する。さらにこの時、各対応関係における順序構造を維持するために、骨形状とその局所曲率分布をトポロジー的に同一である単純形状に射影し、射影された曲率分布間で非線形マッチングを行うことで対応関係を設定する。これにより、骨間において類似した形状特徴量を持つ領域間の対応とその際の順序構造の維持、さらには骨のスケールと位

置姿勢に依存しない対応設定が実現される。実験において、得られた対応関係を用いて作成された統計形状モデルが従来の統計形状モデルに比べ高精度な形状復元能力を持つことが確認された。

第 3 章では骨折症例における骨の 3 次元情報を復元するために、骨折骨を撮影した術中 X 線画像と統計形状モデルを用いて骨折骨片の位置姿勢および形状を再帰的に推定する凸射影法を用いた復元手法を提案している。統計形状モデルは複数の健常骨形状より作成され、個人間における骨の平均形状と平均的な変形を数学的に記述したものである。そのため統計形状モデルはトポロジー変化を伴う骨折骨形状を記述できない。しかし、骨折とは骨片間に相対位置姿勢変化が生じている状態であり、骨片を整復した骨の形状は統計形状モデルを用いて表現可能である。そこで提案手法では以下の 3 つの手順を用いて対応する。(i)統計形状モデルの平均形状を使用して、X 線画像内に写る骨折骨片ごとに位置姿勢推定を行う。(ii)統計形状モデルの形状の最適化を行う。この時、(i)において推定された骨片ごとの位置姿勢情報を用いることで骨折前の骨の輪郭情報を推定し、推定された骨の輪郭情報にマッチングするように形状を最適化する。(iii)凸射影法を用いて(i), (ii)を再帰的に繰り返すことで位置姿勢および形状の最適化を行う。以上の手順により、骨折症例における骨の 3 次元情報を復元する。実験において舟状骨骨折および大腿骨骨折に対し手法を適用し、提案手法による推定が骨片間の位置姿勢によらず安定であることを示した。さらに大腿骨骨幹部骨折を想定したプラスチック骨ファントムを用いて大腿骨骨折整復システムに提案手法を適用した結果、並進誤差 1.9 mm, 角度誤差 0.8° となることが確認された。この誤差は手術支援システムの目標精度である 2mm, 2° を満たしているため、要求精度を満たしていることが確認された。

第 4 章では第 2 章および第 3 章において提案された手法に対する総合的な考察を述べ、また将来展望について述べている。

第 5 章では、本研究の結論が述べられている。

以上をまとめると、本研究は、従来では成し得なかった骨形状のトポロジー変化に対応した形状復元および位置姿勢復元手法とその際に必要となる高精度な統計形状モデルの作成手法を提案した。また骨折を対象とした手術支援システムに本手法を適用し、十分な精度が得られることを示した。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。