

審査の結果の要旨

氏名 羅捷 (Luo Jie)

脳腫瘍の外科的手術において、組織のどの部分を切除するかを決定することは、術後に後遺症を残さないために大変重要である。本論文では、術前磁気共鳴画像を用いた脳外科手術支援システム（ニューロナビゲーション）における画像位置合わせ手法を提案し、不確実性の観点からその有効性を論じるものである。

1章「Introduction」では、まず、脳腫瘍に関する基礎的事項とニューロナビゲーションの全体像を概観している。そして、磁気共鳴画像の位置合わせに関する従来法の紹介し、その特徴や問題点を議論している。その結果、現在の最先端の画像位置合わせ技術を用いても、臓器の伸縮などに起因する位置合わせ誤差は避けられないため、位置合わせの不確実性を脳外科手術支援システムに明示的に取り込むことが重要であると述べている。最後に、本博士論文の貢献と、次章以降の構成が示されている。

2章「Active Image Registration」では、画像の能動的な位置合わせ手法を提案している。ニューロナビゲーションでは、術前磁気共鳴画像における腫瘍の一部が術中磁気共鳴画像では欠落することがあり、従来の位置合わせ手法ではうまく対応が取れないという問題があることを指摘している。また従来研究では、位置合わせの不確実性の尺度も明確に定義されていない。そこで、位置合わせの不確実性を定量的に出力することができ、画像の欠落に対するロバスト性も有する高速な確率的画像位置合わせ手法を提案している。

3章「On the Applicability of Registration Uncertainty」では、位置合わせの不確実性の特徴付けをし、ニューロナビゲーションにおける適用可能性を論じている。具体的には、位置合わせの不確実性を、変換の不確実性とラベル付けの不確実性の2つに分けて考えることにより、従来の研究のようなアドホックでない不確実性の適用可能性を議論できると述べている。実際、ラベル付けの不確実性を論じるために変換の不確実性を用いるという従来のアプローチが適切でないことを示し、ニューロナビゲーションにおいてラベル付けの不確実性を利用することが必ずしも有用であるとは限らないことを示している。

4章「Are Registration Uncertainty and Error Monotonically Associated?」では、位置合わせの不確実性と位置合わせ誤差の関係について論じている。多くの臨床医は、位置合わせの不確実性と位置合わせの誤差には単調な関係があると直感的に信じているが、そのような関係を定量的に調べた研究は知られていない。そこで、神経外科データを用いて、ガウス過程とよばれる機械学習手法による位置合わせの不確実性と位置合わせ誤差の関係を系統的に調べ、点ごとの位置合わせの不確実性と誤差の間には弱から中程度の正の相関があることを実験的に示している。

5章「Related Projects」では、2つの関連研究を紹介している。1つ目の研究では、空間的な依存性を捉えるための地球統計学の分野で用いられているバリオグラムを用いて、ベクト

ル場の外れ値のスクリーニングを行っている。この技術は、2章で提案した確率的画像位置合わせ技術と組み合わせることができるため、融合させることによって画像位置合わせ精度の更なる向上が見込まれると述べている。2つ目の研究では、バリオグラムを使用して、2つの公開データセットのラベルに対して第三者スクリーニングを行っている。その結果、少数のラベルに基準位置決め誤差がある可能性があり、いくつかのケースでのランドマークの分布は公正な性能比較の目的には必ずしも適切でないと報告している。そのため、これらの公開データを用いた実験では、画像位置合わせの性能評価にバイアスが生じる可能性があるとは結論づけている。

6章「Conclusions and Future Work」では、本博士論文の結論と今後の課題について述べている。

以上を要するに、本博士論文は、磁気共鳴画像を用いた脳外科手術支援システムにおける画像位置合わせの手法を提案し、その有効性を位置合わせの不確定性の観点から論じるものである。このような研究成果は、複雑理工学、特に複雑系科学の理解に貢献するものと考えられる。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上1652字