

学位審査報告書

氏名	矢野 大貴 ^{やの だいき}
本籍	大阪府
学位の種類	博士（情報学）
学位の番号	乙第 18 号
学位授与年月日	令和 6 年 3 月 14 日
学位授与の要件	本学学位規則第 23 条
学位論文題目	GPGPU による高速並列処理を実現した肝臓開腹手術サポートシステムに関する研究
論文審査委員	主査 登尾 啓史 副査 魚井 宏高 副査 大西 克彦

論文内容の要旨

近年、IT を利用した外科手術支援システムが注目されている。しかし、術中に臓器を直接計測するものは少なく、その臓器認識精度もよくない。また、メス先端から血管や腫瘍までの距離を実時間で術者に知らせるシステムも少ない。本研究では第 1 章で、従来の典型的な外科手術支援システムを紹介した。そして第 2 章で、臓器をカメラで直接計測し、その実臓器に仮想臓器をリアルタイムに重畳させ、メスが仮想臓器内の血管を切ってしまうように警告を発する、新しい外科手術支援システムを提案する。

まず第 3 章で、光学式 3 次元マーカを用いてメス先端の位置を推定するシステムを作成し、その精度が実用に耐えうることを実験的に確認した。また、メスで切除してはならない血管などに接近したとき、LED レベルメーターが徐々に点灯し術者にその危険を知らせるインテリジェント手術用メスを提案した。

次に、第 4 章では、光学式 3 次元マーカシステムと深度カメラシステムの座標系キャリブレーションを実施したのち、予め DICOM 形式のデータをセグメンテーションし、その肝臓領域を STL 多面体の仮想臓器とし、その仮想臓器の深度画像と深度カメラが撮影した実肝臓の深度画像を重畳させるシステムを製作した。深度カメラからリアルタイムに得られる実臓器の表面形状、および仮想臓器を Z バッファで処理した仮想臓器の表面形状の一致度を Depth-Depth-Matching (以下、DDM) で評価し、その値を焼きなまし法で大局最小に誘導するように仮想臓器を並行・回転移動させ、両方の臓器の表面形状を高精度で一致させるようにした。これより、前述のインテリジェント手術用メスが仮想臓器中で活かせるようになった。

さらに、DICOM 形式のデータのセグメンテーションや STL 多面体の生成といった前処理を経由して仮想臓器の深度画像を得るのではなく、GPU を用いて直接 DICOM 形式のデータから深度画像を生成する手法を開発した。また、外科手術支援システムの応答速度のボトルネックになって

いた CPU における DDM の処理を GPU 上での処理に置き換えることで、提案する科手術支援システムを格段に高速化した。

最後に、第 5 章において、実際の肝臓手術の動画像から肝臓の動きを抽出し、どの程度のシステム応答があれば、手術中にメス先端と血管の接近危険性を医師にリアルタイムに提示可能かについても評価した。その結果、提案する科手術支援システムの応答速度で十分であることを実験的に確認した。

論文審査結果の要旨

本論文では、外科手術支援システムに関する先端的な取り組みについて言及している。近年、血管群や悪性腫瘍の位置や姿勢を正確に術者に伝えるために、医療用ナビゲータが注目されている。この手術用ナビゲータの製作に関する研究は国内外で盛んだが、メス先端から血管までの距離が小さくなった危険性を医師に伝えたり、現実の臓器を計測しそれと仮想の臓器を重畳させたりについての位置精度やリアルタイム性、およびコスト面などに問題があり、実際の手術における利用までの道りは長い。

本研究では、それらの位置精度やリアルタイム性の問題を解決するため、まず光学式 3 次マーカを用いたメス先端の位置推定システムを作成し、その位置精度が医用として十分であることを確認した。また、このメス先端が切つてはいけない血管などに接近したとき、その危険性を LED レベルメーターで術者に警告するインテリジェント手術用メスを製作した。

次に、光学式 3 次マーカシステムと深度カメラシステムの座標キャリブレーションを実施したのち、深度カメラが撮影した実肝臓の深度画像と予め DICOM 形式のデータから STL 多面体として抽出した仮想臓器の深度画像を重畳させるシステムを製作した。深度カメラからリアルタイムに得られる実臓器の表面形状、および仮想臓器を Z バッファで処理した仮想臓器の表面形状の一致度を Depth-Depth-Matching (以下、DDM) で計算し、それを最小化させるように仮想臓器を移動させるという焼きなまし探索をし、両方の臓器の表面形状が重なり合うようにした。

さらに、また、DICOM 形式のデータをセグメンテーションすることで抽出した STL 多面体を用いて仮想臓器の深度画像を得るのではなく、GPU を用いて DICOM 形式のデータから直接深度画像を生成する手法を開発し、外科手術支援システムの高速化を図った。また、外科手術支援システムの応答速度のボトルネックになっていた、CPU による DDM の計算を GPU による DDM の計算に置き換えることで、さらなる応答速度の向上を実現した。

最後に、実際の肝臓手術の動画像から肝臓の動きを抽出し、どの程度のシステム応答があれば、手術中にメス先端と血管などが接近した危険性を医師に知らせることの実用性があるかについても評価した。

以上の様に、本論文では、外科手術支援システムに関して、位置精度とリアルタイム性に新規性を有している。具体的には、メス先端が切つてはいけない血管などに近づくと、その危険性を術者に知らせること、GPU を用いて DICOM 形式のデータから直接深度画像を生成したり、CPU における DDM の計算を GPU における DDM の計算に置き換えたりして、手術に十分な応答速度を実現したこと、およびメスと血管や仮想臓器と現実臓器の位置計測において高い精度を実現したことなどに新規性や有用性がある。このことから本論文は博士学位論文として十分な内容を備えており、関連する成果も適切に公表・発表され、その研究成果は広く社会に周知されている。このことから、博士学位論文としての条件を十分に満たしていると判断し、本論文の審査結果を「合格」とする。