

審査の結果の要旨

氏 名 チャン フィー ホワン

論文題目「Augmented reality system for image guided intervention using auto-stereoscopic visualization」(画像誘導手術のための立体映像を用いた拡張現実システム)の学位論文は、医用三次元 Integral Videography (IV)画像を用いた拡張現実システムを臨床現場で適用するための研究である。具体的には、高速・高精度のIV画像作成アルゴリズムを開発すると共に、拡張現実(AR)環境におけるIV画像と患者の完全に自動的な位置合わせ手法の開発を行った。本研究の成果として、臨床応用性の高い術中のナビゲーションシステムの開発に成功した。

本論文は8章からなり、第1章では拡張現実による画像誘導手術システムの現状を解説し、三次元IV画像の必要性および臨床上の問題点を述べた後に、高精度かつ自動的なIV画像と患者の位置合わせの必要性を述べている。第2章では、本研究の目的として、高速・高精度の画像作成アルゴリズムおよび全自動的な位置合わせ手法の開発、臨床応用として口腔外科手術支援システムの開発を述べている。第3章では、高精度の画像作成アルゴリズムを述べ、GPU実装による画像作成時間の短縮について述べている。第4章では、システムの構成を説明し、拡張現実環境下IV像と患者の位置合わせのためにIV画像および実物の特徴点の同時抽出アルゴリズムを述べている。第5章では、臨床応用として、口腔外科に適用した時の臨床開発について述べている。具体的には、手術対象となる部位の自然特徴点を利用した自動的な患者のトラッキングを実現する。第6章では、個別の要素技術およびシステム全体の評価実験・結果を述べ、第7章では実験の結果に対する考察を述べている。最後に第8章は結論となっている。

まず、IV画像の作成には、三次元CGモデルに対応した視点画像ベースレンダリングを改良し、光線の経路を線密に計算することにより高精度かつ表現力が高いIV画像のレンダリングアルゴリズムを提案した。その結果、IV画像の飛び出し距離が5[mm]から30[mm]の場所において、従来の手法では平均 1.52 ± 0.42 [mm]の飛び出し誤差に対して、提案手法では 0.25 ± 0.20 [mm]の誤差が観測された。また、ディスプレイの前に設置されているレンズアレイの各マイクロレンズ輪郭部に対応した画素に対し、各レンズ間の補間計算を行うことにより従来の手法で問題となったフリッピングが改善され、より広い視域角が得られた。

本研究で提案したIV画像のレンダリング手法は従来の手法より計算量が多くなりましたが、GPUで実装することにより、計算効率が向上され、従来のCPUによる実装と比較すると最大12倍高速化され、リアルタイム性に優れている。

IV像による拡張現実システムは、ハーフミラーにより三次元IV像を実際の患者の体に投影し、手術部位の内部情報およびナビゲーション情報を直感的に術者へ提示するシステム

である。IV画像と患者の自動的な位置合わせについては、IV画像の特徴を考慮したステレオカメラによる画像と患者の三次元位置・形状を同時に測定する手法を開発している。具体的には、IV像および患者の特徴点を右と左のカメラ画像から抽出し、これらの特徴点の三次元再構成することでIV像と患者の変換行列を求める。また、カメラで撮影されたAR画像中のIV像には、表示用のマイクロレンズの模様が写り、IV像の位置測定に必要な特徴点抽出アルゴリズムに影響されている。本研究では、独特のレンズ模様の除去アルゴリズムを開発し、AR画像他の部分に影響を及ぼさずに、IV像だけに対するのレンズ模様を除去し、IV像および患者の特徴点を同時に抽出することを可能にした。

以上の要素技術を利用し、口腔外科の次世代の手術支援システムを構築している。手術者の負担を軽減するために、完全にマーカを必要としないナビゲーションを実現している。口腔外科の手術環境を再現し、顎骨領域の自然特徴点を利用した患者のマーカレス認識・トラッキング技術を開発した。具体的には、①歯茎の自然特徴点の抽出による初期レジストレーション、②歯の輪郭抽出およびSURF(Speed Up Robust Features)特徴量記述法とICP(Iterative Closest Point)マッチング手法による高精度レジストレーションが実装されている。

顎骨モデルを利用した評価実験の結果により、完全に自動的な位置合わせが3秒以内で実現され、これまでのナビゲーションシステムに対して大幅に術者の負担を軽減した。また、カメラ画像から位置合わせ精度を評価したところ、IV画像と実物(患者のモデル)との平均位置誤差は 0.86 ± 0.41 [mm]であり、最大位置誤差は 1.8 [mm]と、高精度が実現された。

以上により、本研究では、三次元IV画像を用いた治療用の拡張現実システムを開発し、手術者への負担を最小限に抑えながら正確かつ直感的に手術を誘導することを可能にした。従来のIVレンダリング手法の問題点を解決し、高速・高精度な画像作成アルゴリズムを提案すると共に、AR環境に特化した自動的な位置合わせ技術を開発し、AR分野では非常に有効な技術となっている。また、口腔外科において、解剖学的な特徴点を利用した完全にマーカレスの患者トラッキング技術を開発し、これまでのナビゲーションシステムに無い位置合わせ作業の容易さと正確さを実現されている。将来の展望として、本システムは多くの臨床アプリケーションに適用することが期待できるものである。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。