

## 論文の内容の要旨

# 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)

チャン フィー ホワン

## 背景

手術を支援する画像誘導システムは正確におよび直感的にナビゲーション情報を術者に提供することが求められる。従来の二次元ディスプレイによる画像誘導システムは奥行き情報が欠如し、ディスプレイが手術部位から離れるため、直感的な三次元構造の理解が困難である。そのため、微小な血管や神経等と他の組織との位置関係を把握することは困難であり、正確に手術を行うために高い熟練度が要求される。

上記の問題を解決するために、三次元インテグラルビデオグラフィ (Integral Videography, IV) を用いた手術支援のための拡張現実システムに関する研究を行う。IV とはマイクロ凸レンズアレイと高密度液晶ディスプレイを用いた光線再構成型の立体表示技術である。更に、表示されている IV 画像をハーフミラーを用いて直接手術部位にオーバーレイし、術中に視線の移動が無く高臨場感の手術誘導を実現する。

IV 画像による手術誘導システムを構築する際に高精度の画像が必要となり、また立体感を強調するために、リアルタイム性をた豊かな表現力を持ったレンダリング手法が必要となる。正確な位置に表示するために IV 画像の計測・トラッキング技術を開発し、術者に負担を掛けず、簡単なレジストレーション方法を提案する必要があると考えられる。

## 目的

本研究では三次元 IV 画像を用いた手術支援のための拡張現実システムの臨床応用化に向けて、以下のことを行う。

1. 三次元位置が正確、豊かな表現力を持った IV のリアルタイムレンダリング方法の開発
2. 空間中に表示される IV 画像の計測・トラッキング技術の開発
3. 術者への負担を軽減するために、自動的な画像・患者間のレジストレーションの開発
4. 口腔外科における評価を行い、臨床応用化における問題点の解決

## 方法

## 1. IV のレンダリングアルゴリズム

豊かな表現力を持ったサーフェスモデルを用いた多視点画像の画素再分配による IV の作成法は先行研究で開発された。この手法では、厳密な光線経路の計算が行われなため、観察する時に画像の歪みが生じ、医療応用に適切ではなかった。今回は画像ベースレンダリングにおける光線の記述法を用い、光線のパラメータ空間で厳密な計算を行うことで、正確な画像作成を提案する。更に、レンズの周辺部の画像に関して、光線の補間計算を行い、視域内での画像の切り替えを防ぐ。

光線の記述および補間計算を行うために、膨大な計算が必要となり、従来と比べて計算量が大幅に増加する問題がある。本研究では、画像をリアルタイム作成するために、提案したレンダリングアルゴリズムを GPU (Graphical Processing Unit) に実装し、画像作成の高速化を実現する。具体的に、視点画像の作成と IV 背面画像の作成を二つのレンダリングパスで行い、一回目のレンダリング結果（視点画像）をテクスチャに保存し、二回目のレンダリングで利用することで、GPU と CPU 間のデータ転送が無く、高速な計算が可能となる。

## 2. IV 画像の計測・トラッキング

IV 画像を正確な位置に表示するために、現在表示されている画像のグローバル座標系における座標を計測する必要がある。IV 画像の特徴として、実物が存在しないため接触式や反射式の計測法を使用することができない。そのため、ステレオ法を用いて、カメラでキャプチャした IV 画像に対して、画像処理を行うことで IV 画像の三次元形状を計算する方法を採用する。

三次元形状を計測するために、キャプチャした画像から特徴点を抽出し、右と左画像における特徴点の対応関係を求めることで特徴点の深度を計算する。しかし、キャプチャした IV 画像にはレンズアレイの様子が写り込んで、特徴点を正しく検出することができなくなる。本研究では、キャプチャした IV 画像に対して、周波数領域でフィルター処理を行い、レンズアレイ成分の周波数を取り除くことで正しく特徴点の抽出を実現する。

## 3. 自動的な患者・画像レジストレーション

従来のシステムで光学式マーカーを利用し、患者・画像間の位置合わせを行ったが、画像および患者の座標取得には手動な作業が必要であり、またマーカーフレームの存在により術者のワークスペースが高速される問題がある。本研究ではステレオカメラを用い、IV 画像および患者の計測・トラッキングを自動的に行うことで術者への負担を軽減する。

IV 画像の計測は前節で説明した方法で行う。計算の簡略化のため、IV 画像に計測用の特徴点を作成し、これらの点のみに対して計測を行う。

患者の計測は、手術によって対象となる部位が異なるため、特化したアルゴリズムを開

発する必要がある。今回では、口腔外科の手術支援システムとして、患者の計測・トラッキングアルゴリズムを開発する。

患者のトラッキング方法として、カメラ間の変換にロバストな特徴量に基づいたマッチング法を採用する。具体的には、術中のカメラ画像から歯の領域だけを抽出し、領域の輪郭点を特徴点とする。次に、SURF (Speed Up Robust Features) 特徴量記述を用い、各特徴点における特徴量を計算する。計算した特徴量ベクトルの類似度に基づいて、右と左画像の特徴点の対応関係を求め、三次元位置を計算する。

計算された三次元特徴点群に対して、事前に CT 画像から構成された患部の三次元モデルと比較し、変換行列を求める。変換行列を求めるには、ICP (Iterative Closest Point) を利用する。

## 結果

### IV 画像のレンダリング

作成された IV 画像に対して、三次元感触デバイス Phantom Omni を用い、被験者によるポインティングを行った。従来の作成方法に対して、本研究で提案した手法を使った時、被験者はより正確なポインティングが出来ることを確認した。

1024×768 ピクセルの IV 画像をレンダリングする時、本研究で提案した GPU による計算は、従来の CPU を使った計算より最大 12 倍の速さに達した。実験に使用したすべてのサーフェスモデルに対して、10 fps (frame per second) の速度で画像の更新が出来、手術には十分な更新速度になった。

### 口腔外科における評価実験

下顎の模型を用い、IV 画像オーバーレイシステムの臨床における IV 画像の位置合わせ精度を評価した。光学式トラッキングを利用した実験では、位置合わせ精度は 0.7 mm となり、口腔外科で要求される精度を満たしたが、位置合わせには時間がかかり、臨床で使うためにはより簡単な方法が必要であることがわかった。一方でステレオカメラ (画素数 640×480 ピクセル、1 画素のサイズ  $9.9 \times 9.9 \mu\text{m}$ ) を用いた実験では、自動的により術者の負担を大幅に軽減出来た。位置合わせ精度は 1.5 mm となり、特徴点抽出および変換行列の計算に必要な処理時間は 3.5 秒であった。

## 考察

本研究では多視点画像を用いた IV 画像の作成アルゴリズムに置いて、光線経路を厳密に計算することで、医療応用に適した正確な IV 画像の作成法を提案した。提案した手法では計算量が増加するが、GPU に実装することにより、ほぼリアルタイムで画像の更新が出来た。

IV 画像の測定およびトラッキングアルゴリズムは、今回の実験対象である口腔外科に限らず、幅広い分野で応用可能な画像認識ツールである。患者の計測・トラッキングは、手術の対象に対応したアルゴリズムの開発が必要となる。

ステレオカメラを用いた位置合わせ精度は現時点では 1.5mm となったが、術者に全く負担が無いと言った点では臨床応用に置いて非常に有力な手法である。将来的に、ハードウェア（カメラ）およびソフトウェア（特徴点検出）の改善により、1mm 以下の精度が実現可能だと考えられる。

## 結論

外科手術をより安全に行えるために、三次元 IV 画像を用いた拡張現実システムを開発した。IV 画像の作成法を改善し、より正確な画像をリアルタイムで提示することができた。ステレオカメラを用いた IV 画像の計測・トラッキング方法を提案し、幅広い分野での応用が期待される。これらの結果により、口腔外科に置いて自動的な位置合わせフレームワークを提案し、術者への負担を軽減することで臨床における有効性が確認された。