

論文の内容の要旨

論文題目 医用 3 次元画像と脳表写真とを融合表示させる複合現実技術の開発

氏名 小池 司

背景：脳神経外科手術において、術野所見と医用画像との空間的対応関係を照合することは重要であるとともに困難である。これらを同一座標系で観察するための手段として、複合現実技術を用いた画像誘導手術支援システムが報告されている。複合現実技術とは、現実空間の画像情報と医用画像とを視覚的に位置合わせして融合表示する手法であり、観察する主軸を現実空間におく拡張現実技術と、観察する主軸を仮想空間におく拡張仮想技術がある。既存の画像誘導手術支援システムの報告において、拡張現実技術では融合表示した 3 次元の医用画像の奥行きが分かり難い、観察する角度や視野に制限があるなどの課題がある。一方拡張仮想技術では、現実空間の位置情報と画像情報とを得るために手術ナビゲーションシステムなどの大規模な装置を必要とすることや、高分解能を有する 3 次元の医用画像を表示されていないといった課題がある。本研究では、これらの課題を解決すべく、仮想空間において高分解能を有する医用 3 次元画像とデジタルカメラで撮影した脳表写真とを融合表示させる複合現実技術を 2 つ考案した。1 つ目はランドマーク技術を用いて融合表示する手法で **Mixed-reality computer graphics 1(MRCG1)** とし、2 つ目はプロジェクションマッピング技術を用いて融合表示する手法で **Mixed-reality computer graphics 2 (MRCG2)** とした。それらの各々位置合わせ精度を検証した後、各々の性能を比較した。

方法 1：提案開発 1 (MRCG1)

術前に医用 3 次元画像を作成した。手術中に脳表写真を取得し、開頭野内の対応する解剖構造にランドマークを手動で設置した。設置したランドマークを制御点とした薄板スプライン変換で脳表写真を変形し、医用 3 次元画像と融合表示した。融合表示したものを **MRCG1** と呼称することとした。初回手術を行った脳腫瘍の 15 例に対して、**MRCG1** を手術中に作成した。位置合わせ精度の検証として、**MRCG1** 上の医用 3 次元画像の血管と脳表写真のそれとの 3 次元的な誤差を **Target registration error (TRE)** で計測することとした。設置したランドマークの中間点を各症例 10 か所ずつ、開頭野で均等に恣意性を排除すべく脳神経外科医 2 名の合議制で計測した。

方法 2：提案開発 2 (MRCG2)

手術中に取得した脳表写真の画像データであるテクスチャの中心座標を位置量、投影するための方向と角度を姿勢量と定義した。脳表写真テクスチャを最適な位置量と姿勢量とを得ることで、脳表写真テクスチャを医用 3 次元画像にプロジェクションマッピングで投影する方法を考案した。まず、術前に医用 3 次元画像を作成した。脳表写真テクスチャの

最適な位置量と姿勢量とを求めるために、医用 3 次元画像から医用 3 次元画像テクスチャを取得した。医用 3 次元画像テクスチャに対して脳表写真テクスチャを、正規化相互情報量法を用いて位置合わせして、脳表写真テクスチャの位置量と姿勢量とを求めた。脳表写真テクスチャを医用 3 次元画像に平行投影にて投影することで融合表示を行った。融合表示を行ったものを MRCG2 と呼称することとした。MRCG1 と同様の脳腫瘍 15 例に対し MRCG2 を作成した。MRCG2 の位置合わせ精度の検証を 2 つの方法で行った。1 つ目は、MRCG2 上の医用 3 次元画像と血管と脳表写真のそれとの位置合わせ精度を MRCG1 で計測した場所と同じ部位で TRE を 10 か所ずつ、脳神経外科医 2 名の合議制で計測した。2 つ目は、MRCG2 における開頭野内の中心領域と辺縁領域とでの位置合わせ精度の違いを評価した。1 つ目に評価と同様の対象において、MRCG2 の開頭野内を 16 分割し、内部の 4 領域中心領域とし、外部の 12 領域を辺縁領域と定義した。計測可能な医用 3 次元画像の血管と投影された脳表写真テクスチャのそれとの中心線の 3 次元的なずれを TRE で計測した。TRE の計測部位が均等に分布するべく分割された各領域で 1 か所までとし、脳神経外科医 2 名の合議制で、中心領域と辺縁領域との計測結果を比較した。ウィルコクソンの順位和検定を用いて有意差水準を 5% として設定した。

方法 3 : MRCG1 と MRCG2 との比較

考案した 2 つの手法の性能の比較を 4 つの項目で行った。1 つ目は、位置合わせ精度を比較した。MRCG1 と MRCG2 とで、MRCG1 のランドマークの中間点において、医用 3 次元画像の血管と融合表示した脳表写真のそれとの中心線のずれを TRE として計測した。MRCG1 と MRCG2 とで同じ場所を各症例 10 か所ずつ計測し、その値を比較した。2 つ目は、画像処理の所要時間を比較した。脳表写真をソフトウェアに取り込んだ時点を計測開始とし、融合表示を完了した時点を計測終了として、画像処理に要する時間を計測し比較した。3 つ目は、フレームレートを比較した。フレームレートは操作性の指標となる。仮想カメラが MRCG1 と MRCG2 との周囲を一周して観察するコマンドを実行し、その際のフレームレートの最大値を比較した。4 つ目は、両者の外観を比較した。外観として、脳形状の再現性と透過表示した際の視認性とを比較した。統計学的解析は、1 つ目から 3 つ目の比較を対応ある 2 群の t 検定で解析した。有意差水準を 5% として設定した。

結果 1 : MRCG1 の位置合わせ精度評価

MRCG1 の融合表示精度の検証では、融合表示精度である TRE は 0.52 ± 0.04 mm (平均 \pm 標準誤差、以下同様)であった。TRE の最大値は 2.26mm、最小値は 0.04mm であった。設置したランドマーク数は平均 25.6 個であった。

結果 2 : MRCG2 の位置合わせ精度評価

MRCG2 の融合表示精度の 1 つ目の検証での TRE は、 1.04 ± 0.14 mm であった。TRE

の最大値は 13.20mm、最小値は 0.07mm であった。2 つ目の検証では、中心領域での TRE は $0.91 \pm 0.25\text{mm}$ 、辺縁領域でのそれは $1.32 \pm 0.17\text{mm}$ であり、中心領域で融合表示精度は高いものの統計学的有意差は認めなかった($P = 0.1694$)。

結果 3 : MRCG1 と MRCG2 との比較

1 つ目の融合表示精度の比較は、MRCG1 では $0.52 \pm 0.04\text{mm}$ 、MRCG2 では $1.04 \pm 0.14\text{mm}$ であり統計学的に有意差を認めた($P = 0.001$)。2 つ目の画像処理の所要時間では、MRCG1 では平均 12 分 0 秒、MRCG2 では平均 16 分 58 秒であり、MRCG1 が統計学的に有意差をもって短かった($P = 0.001$)。3 つ目のフレームレートの比較では、MRCG1 のフレームレートは 36.2fps であり、MRCG2 でのそれは 49.1fps であり統計学的有意差を認めた($P = 0.001$)。4 つ目の外観の比較では、MRCG1 では融合表示した脳表写真から、医用 3 次元画像の脳が逸脱する部位があり再現性が低かった。一方 MRCG2 では、脳表写真の画像が医用 3 次元画像の脳表に追従し再現性が高かった。透過表示した際の視認性は、MRCG1 では、脳表写真をポリゴン化しているので、複数のモデルを透過表示した際に奥のものが表示されないなど視認性が低下したが、MRCG2 では、透過表示しても視認性が低下することはない。

結論：現実空間の情報である脳表写真と医用 3 次元画像とを、複合現実技術を用いて融合表示する手法を 2 つ考案した。2 つの提案開発は、現実空間の情報と医用画像との空間的に高精度な位置合わせが可能であり、画像誘導手術支援システムとして活用できる可能性が示唆された。