

[研究助成 (A)]

人間機械協調型複合現実融合技術を用いた手術支援基盤技術の開発

2241014



研究代表者

東京大学 大学院医学系研究科
医用情報工学

特任教授

金 太 一

[研究の目的]

1. 研究の目的と意義

外科手術支援では、仮想空間（医用画像）と現実空間（手術野）との座標系を一致させて両者を比較する必要がある。しかし、両者の性質（解像度や手術進行に伴う変化）が大きく異なるため、AI（人工知能）技術による自動位置合わせは不可能であるといわれている。よって、現状では医師が頭の中で医用画像と手術野との対応関係を推定しており、客観性、他者との情報共有性、および再現性の観点から大きな課題となっている。本研究では人間がインタラクティブにAI処理を修正するという、人間とAIとの協調作業によって仮想空間（医用画像）と現実空間（手術野）とを高精度に空間的に対応付けし、更に現実空間情報を歪ませて仮想空間情報へ融合させるという革新的な複合現実可視化技術を開発する。提案手法によって、人間の最小限の介入によってAIの精度や信頼性が飛躍的に向上し、仮想空間上に本物そっくりの手術野のデジタルツインが構築されるので、これまでになかった革新的な手術支援を提供できる可能性があり、メタバース医療や脳機能解明研究などにも貢献する可能性を有する。

2. 研究目標

研究期間中に、人間機械協調型複合現実融合技術を用いた手術支援の基盤技術を開発し、その技術的精度および臨床的有用性を評価する。

そのために下記の5つの技術的課題を解決する。

- ① 医用3次元コンピュータグラフィックス（3DCG）構築；MRIを入力データとして脳3DCGを出力するAIモデルを開発する。
- ② 医用画像と手術野写真との位置合わせ処理；手術野情報（写真）をバッチ処理したAIモデルによって擬似的な非剛体変換として上記①の脳3DCGへ手術野情報を位置合わせする技術を開発する。
- ③ Human-computer interaction 技術による位置合わせ補正技術；上記②のAI処理に対して人間のインタラクティブな操作介入を可能とさせるユーザインターフェース技術を開発する。
- ④ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合可視化技術の開発；上記③によって座標系が一致した手術野情報と医用画像情報とを複合現実技術を用いて融合し、デジタルツイン手術野を完成させる。
- ⑤ システムの精度検証と臨床評価；脳腫瘍手術症例にて提案システムの精度や臨床的有用性を評価する。

3. 本研究の特色・独創的ポイント

- ① 現実空間を歪ませる複合現実技術；現実空間と仮想空間との情報融合に関する先行研究では、両者を変形させないままか、仮想空間情報のみを変形させて融合させる報告はあるが、提案手法のように現実空間を歪ませて仮想空間上で高解像なデジタルツイ

ン手術野を再構築する報告はなく、メタバース医療など様々な用途での活用が見込まれる。

- ② 人間と AI の協調作業による高精度な位置合わせ技術；医用画像と手術野との空間的対応付けは、両者のデータの性質が大きく異なるために、AI による自動処理は不可能とされている。一方で人間が手動的にこの空間的対応付けを実施することはできるが、膨大な時間と手間を要する。提案手法では AI 処理に対して任意のタイミングで人間が介入し、その精度を向上させるものであり、人間と機械の協調処理を活かした独創的な試みである。更にその介入には 2D と 3D の異次元間を dual cursor 法によってリンクさせるというユーザーインターフェース技術を用いる先行研究のない独創的なものである。

4. 学術研究としての位置付け

- ① 複合現実技術による手術支援；類似研究である拡張現実技術（AR）は医用画像を現実空間へ投影する技術であり、対象物の表面に情報が投影されるので、奥行き情報がない。また、対象物の裏側や内部を観察することもできない。提案手法は、現実空間情報を歪ませて仮想空間上で手術検討を実施するもので、どのような角度・視野でも対象物を観察できる独創的な技術であり、研究代表者が所属する研究室以外からの報告は皆無である。
- ② 人間と AI の協調作業による高精度な位置合わせ技術；先行研究の位置合わせ技術としては、自動処理、手動的処理、剛体、非剛体など様々なものが提案されているが、いずれも自動のみ、手動的処理のみ、もしくは両者を交互に独立して行うものである。人間とコンピュータが同時進行的にインタラクティブに共同作業をおこないつつ非剛体位置合わせをする提案手法に類似した技

術は存在しない。

[研究の内容、成果]

1. 研究計画

下記の順番通りに実施する。

① 倫理委員会承認（1ヶ月間）

本研究では実際の手術患者のデータを使用するので、研究に先立って東京大学医学部倫理委員会の承認を得る。東京大学医学部附属病院脳神経外科での手術患者から同意を得た医用画像データのみを試料として用いる。本研究で使用する医療情報は、一般の術前検査として必須の CT や MRI などの医用画像データのみを用いるので、今回の研究に対して新たに検査そのものを追加することはなく、研究対象者への侵襲は一切ない。また研究期間中は、本研究成果が実際の医療の診断や治療方針に介入することはない。

② 深層学習技術を用いた医用 3D 画像構築技術の開発（2ヶ月間）

本研究申請者が既に研究開発している深層学習技術を用いた医用画像データからの 3DCG 自動構築法をブラッシュアップして、医用画像データから患者固有の脳 3DCG を出力する深層学習モデル（3D U-Net を改良したアルゴリズムを予定）を開発する。学習データは T1 強調画像データ（約 40000 枚）とし、脳をセグメンテーションした教師データを作成する。更に新規技術として生成 AI（PTNet を予定）を用いた 3DCG のノイズ処理技術も開発する。達成目標は Dice 係数 98% を目指す。

③ 深層学習技術を用いた医用画像と手術野写真との位置合わせ処理技術の開発（2ヶ月間）

現実空間の実際の手術を写真撮影したデータをミニバッチ処理によって数百の正方形の画像データに再分割し、AI アルゴリズム

ム ResNet を用いて、3DCG と位置合わせ処理する。写真データを再分割することによって、擬似的な非剛体位置合わせ処理が可能となる。高精度な位置合わせは困難であることがわかっているので、位置合わせ誤差 3 mm 程度を目指し、下記④の処理によって精度を向上させる。

- ④ Human-computer interaction 技術による位置合わせ補正処理技術の開発（2ヶ月間）
上記③による手術野写真と脳 3DCG との位置合わせ処理の修正機能として dual cursor 法による支援技術を開発する。Dual cursor 法とは本研究申請者が有している独自技術であり、具体的にはユーザーが手術野写真と脳 3DCG との一致対応点を探索する際に、手術写真上の 2 次元のマウスカーソルと脳 3DCG 上の 3 次元のマウスカーソルとが異次的にリンクして動くことによって両者の一致点を設定する処理を効率化させたユーザーインターフェース技術である。本法を上記③の AI 処理の前後や途中で介入できるようにすることによって位置合わせ精度を向上させる。達成目標は提案手法を用いない AI 位置合わせ処理よりも有意に（2 mm 以上）精度が向上すること、ユーザーの作業時間は 1 分以内、手術野写真と脳 3DCG との最終誤差が 1 mm 以内を目指す。
- ⑤ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合 3DCG 構築技術の開発（2ヶ月間）
上記③④で座標系を一致させた手術野写真と脳 3DCG とを融合可視化する技術を開発する。具体的には上記③④で非剛体変換された手術野写真情報をテクスチャマッピング法を用いて脳 3DCG へテクスチャする。本研究申請者は、本法の先行研究として、AI を用いない用手的な複合現実技術に関して既に複数の論文を報告しており、本研究ではそれを AI と human-computer interaction 技術を用いることによって精

度向上および効率化を目指す。達成目標は提案複合現実 3DCG と実際の手術所見との誤差 1 mm 以内、用手的操作も含めた処理時間が 1 分以内を目指す。

- ⑥ 提案手法を有するアプリケーション開発（1ヶ月間）

上記③～⑤の機能を有するモバイルアプリ（iPad アプリ）を開発し、アプリ上での複合現実 3DCG の回転・平行移動・ズームなどの操作が 30 fps 以上を達成目標とする。

- ⑦ 臨床症例での有用性を確認（1ヶ月間）

上記⑥で開発したアプリを用いて、実際の手術症例を用いて精度と有用性を評価する。脳腫瘍覚醒下手術 3 症例に使用する。医用画像から得られた脳機能情報（言語機能）と手術野の脳を電気刺激して得られた脳機能マッピングの空間的ズレを調査する。精度は 1 mm 以下を目指す。またコントロール群として市販手術ナビゲーションシステムを用いた手術支援と比較し、両者の誤差や有用性を比較する。

- ⑧ 成果取りまとめ（1ヶ月間）

上記研究終了後に成果や課題を取りまとめて、研究期間終了後の更なる研究開発について計画を策定する。

2. 成果

計画通りの進捗であり、研究期間中のマイルストーンは全て達成した。研究開発項目毎の進捗は下記の通り。

- ① 倫理委員会

東京大学医学部倫理委員会の承認を得た後に本研究を開始した。

- ② 深層学習技術を用いた医用 3D 画像構築技術の開発

T1 強調画像データからセグメンテーションした大脳の精度は Dice 係数 0.982 であった。生成 AI を用いた 3DCG のノイズ処理技術の精度は Dice 係数 0.962 であ

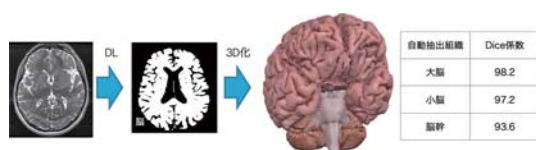


図1 脳自動セグメンテーション

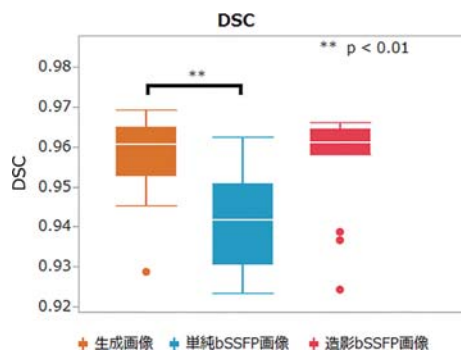


図2 ノイズ（静脈）処理

た。

- ③ 深層学習技術を用いた医用画像と手術野写真との位置合わせ処理技術の開発

AI アルゴリズム ResNet を用いて、手術写真と 3DCG と位置合わせ処理した。精度に関しては下記④に記載。

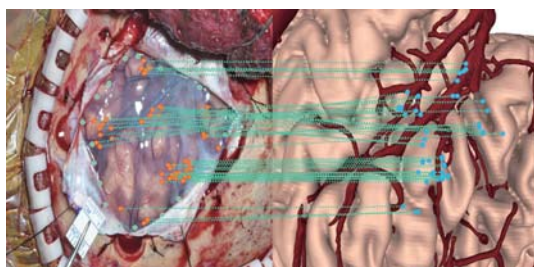


図3 ResNetによるレジストレーション処理

- ④ Human-computer interaction 技術による位置合わせ補正処理技術の開発

手術野写真と脳 3DCG との位置合わせ処理の修正機能として dual cursor 法による支援技術を開発した。10 症例の検討にて誤差は 1.32 ± 0.17 mm (mean $\pm$ SE) であり、提案手法を用いない AI 位置合わせ処理よりも有意に精度が向上することを確認した。ユーザーの作業時間は 60 秒であった。

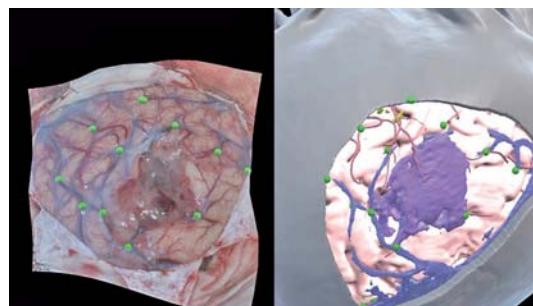


図4 Dual cursor 法による補正処理

- ⑤ 複合現実技術を用いた医用画像と手術野との融合 3DCG 構築技術の開発

上記④で座標系を一致させた手術野写真と脳 3DCG とを融合可視化する技術を開発した。10 症例の検討にて、提案複合現実 3DCG と実際の手術所見との誤差は、 1.04 ± 0.14 mm (mean $\pm$ SE) であり、手作的操作も含めた処理時間は平均 90 秒であった。

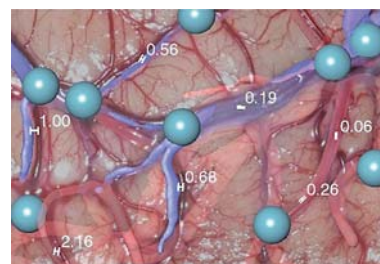


図5 複合現実技術 3DCG

- ⑥ 提案手法を有するアプリケーション開発
上記③～⑤の機能を有するモバイルアプリ (iPad アプリ) を開発した。アプリ上での

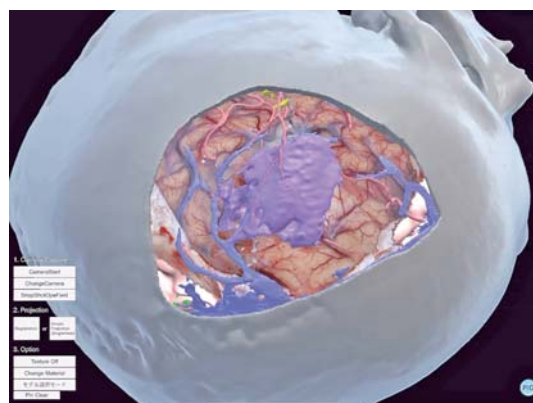


図6 開発したモバイルアプリケーション

複合現実 3DCG の回転・平行移動・ズームなどの操作を実装し、36.2 fps を達成した。

⑦ 臨床症例での有用性を確認

開発したアプリを用いて、脳腫瘍覚醒下手術 3 症例に使用した。開発アプリは実際の手術にて不具合なく使用することが可能であった。腫瘍摘出のための腫瘍境界の同定、脳機能画像との高精度な比較、ブレインシフトに対応した医用画像との高精度な比較が可能であった。



図 7 臨床活用（悪性脳腫瘍）

【成果の発表，論文など】

2025 年 5 月 20 日時点で 2 編の論文を投稿中、1 編を投稿準備中である。本研究に関して学会発表を 2 回実施した。

【論文】

1. 自動セグメンテーション処理に関して投稿中
2. 生成 AI を用いた医用画像ノイズ処理に関して投稿中
3. 臨床的有用性に関して投稿準備中

【学会発表】

1. 「手術検討を中心とした脳神経外科領域における画像処理やその活用」第 15 回お茶の水 Neuroimaging Conference. 8 月 27 日、東京
2. 「Augmented reality and virtual reality in surgical training and practice」JKJC 2024. 9 月 4 日、ソウル