

頭部 MR 画像の構造的特徴を用いた脳表可視化法

加藤 潤 一^{†1} 松田 浩 一^{†2}
西本 英明^{†3} 小笠原 邦昭^{†3}

脳表における髄膜腫の手術計画において、腫瘍と静脈の関係を把握する必要がある。しかし、MR 画像には頭皮などが含まれ、3次元表示しても脳表面構造を選択的に見ることができない。そのため、手作業による可視化作業が行われているが、時間的負担が大きい。本稿では、「作業時間短縮」と「可視化した脳表上の構造をわかりやすく医師に提示すること」を目的とし、MR 画像における脳表組織の可視化法を提案する。

A brain surface visualization method using the structural features of brain MR images

JUNICHI KATO,^{†1} KOICHI MATSUDA,^{†2}
HIDEAKI NISHIMOTO^{†3} and KUNIAKI OGASAWARA^{†3}

The surgical approach for brain meningioma in the brain surface, there is a requirement to present easy to understand the relationship tumors and veins on the brain surface. However, MR imaging is impossible to understand the brain surface structure selectively on 3-D viewer. Therefore, the radiological technicians are visualizing the brain surface by partial removal and adjustment the threshold to the MRI data. But even the radiological technicians who were familiar with the work take time to visualize. In this paper, we propose a visualization of brain surface in the MR images for "Reduce working time" and "present the structure of the brain surface to doctors clearly".

^{†1} 岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究所
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

^{†2} 岩手県立大学ソフトウェア情報学部
School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

^{†3} 岩手医科大学脳神経外科講座
Department of Neurosurgery, Iwate Medical University

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、コンピュータ技術の発展に伴い、多種類の医療用画像を用いることが可能となり、より多くの情報を得ることが可能となった。現在、医療の現場では医療用画像を用いた診断が行われている。その中でも脳は、身体中へ命令を出す重要な役割を果たしており、脳に疾患があると身体全体に影響を及ぼす恐れがあるため、脳を診断することは非常に重要である。

脳表に発生する疾患の一つである髄膜腫の手術アプローチ検討において、腫瘍と静脈の関係を把握する必要がある。医師は2次元のスライス画像(図1)を用いて診断をするが、複雑な血管走行を完全に把握することは困難な場合があり、MR画像を3次元表示することで血管走行を理解したいという要望がある。しかし、造影されたMR画像(T1強調)において、脳や血管は頭皮に覆われているため、そのまま3次元表示を行っても脳表や静脈などの情報を選択的に見ることが不可能である(図2)。

そのため現状では、MRIボリュームデータに対して、ワークステーションでの閾値調整と部分削除による可視化作業が放射線技師により手作業で行われている。手作業による可視化作業結果画像を図3に示す。しかし、この可視化作業は慣れた技師でも1時間弱程度拘束されてしまう。また、特定の機器を利用した可視化作業手順¹⁾が確立されているが、この手法も手作業の割合が大きい。そこで、放射線技師の負担軽減のために画像処理を用いた可視化作業の自動化による拘束時間の低減が必要であるとされている。しかし、MR画像における脳組織は輝度が不定であるために画像処理の閾値を一意に決めることができず、自動抽出することが困難である。また、上野らの脳実質抽出手法²⁾では、腫瘍や静脈を含む高輝度値を除外し、脳実質として指定された一部の輝度値の統計量から脳実質を抽出するため、脳実質と静脈や腫瘍を同時に抽出不可能である。

上野らの手法を用いて、先行研究³⁾では、個人差があまり影響しない部分の抽出を画像処理によって自動化し、個人差が影響する部分を大まかな手描き入力で抽出し、脳表を可視化した。先行研究による結果画像の例を図4に示す。しかし、(i)頭皮が残存している、(ii)脳表を覆う髄膜が存在している、(iii)脳溝が不明瞭である、という問題が挙げられ、これらの解決が課題とされていた。

1.2 研究目的

本研究では、(i)頭皮が残存している、(ii)脳表を覆う髄膜が存在している、(iii)脳溝が

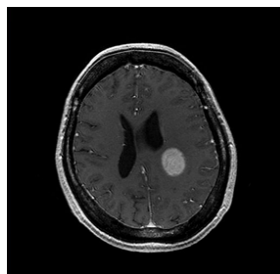


図 1 スライス画像例
Fig.1 A example slice of MRI

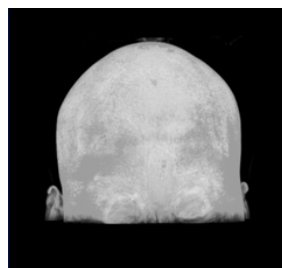


図 2 3次元表示したMR画像
Fig.2 A MR image on 3D viewer

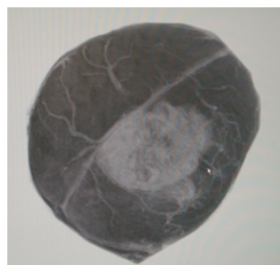


図 3 手作業により可視化された腫瘍と脳表静脈
Fig.3 A MR image visualized by hand

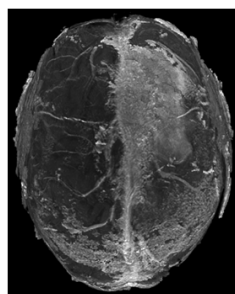


図 4 先行研究による脳表可視化結果画像
Fig.4 A surface visualized by leading technique

不明瞭であるという3つの問題を解決することで脳表可視化画像の品質を向上することを目的とする。頭部MR画像に含まれる組織は、脳実質を起点として相対的に層状の構造を持っており、先行研究ではこの情報を考慮していない。そこで、頭部MR画像の構造的特徴を用いた脳表可視化法を提案する。本研究では、先行研究に加えて、MR画像において脳表を構築する組織を輝度変化から判別することで、先行研究の問題点の解決を図る。

2. 問題解決アプローチ

先行研究における3つの問題点について、先行研究のアルゴリズムにおける問題点と頭部MR画像の要素から問題分析を行い、これに基づいて解決アプローチ方法を決定する。本章では、先行研究における問題点と、それに対する解決アプローチ方法について述べる。

2.1 先行研究について

- (1) 手描き入力による腫瘍部位の指定
造影剤を投与したMR画像において、脳実質と腫瘍は輝度が大きく異なるため、セグメンテーションされた脳実質には腫瘍が含まれない。この問題を解決するために、3方向のスライス画像に対する腫瘍輪郭線の手描き入力により大まかに腫瘍領域を指定・抽出する。図5に手描き入力による腫瘍部位の抽出例を示す。
- (2) 脳実質に対する動的輪郭抽出
セグメンテーションされた脳実質の外側に脳表静脈は存在するため、脳実質を表示領域として頭皮の内側方向に一定量膨張させることにより、脳表静脈を表示領域に含むことができる。
しかし、脳実質は表面上に脳溝を構成しており、脳実質と静脈との距離が一定でないため、頭皮まで膨張したときに静脈の一部が削れてしまう。そこで、脳実質の輪郭を抽出することができる動的輪郭法を用いて脳実質の輪郭を抽出する(図6)。抽出した輪郭の内部を表示領域とすることで脳溝を埋める。
- (3) 抽出した領域に対する膨張処理
セグメンテーションされた脳実質の外側に脳表静脈は存在するため、脳実質を膨張させることによって脳表静脈を表示する。脳実質データはボリュームデータであり、このデータに対してモルフォロジー演算のDilationを8回行う。この反復回数は経験的に設定した。

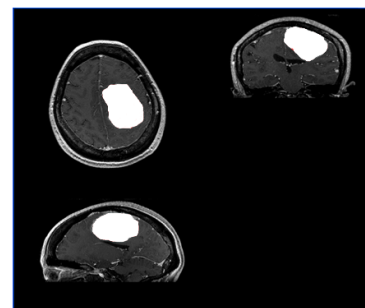


図 5 手描き入力により定義された腫瘍部位
Fig.5 Tumors defined by handwriting



図 6 抽出された輪郭
Fig.6 a extracted contour

2.2 頭部 MR 画像に含まれる脳組織

本研究が対象とする頭部 MR 画像には、(a) 脳実質、(b) 静脈、(c) 腫瘍、(d) 脳脊髄液、(e) 髄膜、(f) 頭皮が含まれる。本研究では、これらの組織が持つ相対的な輝度と位置関係に着目した。以下、脳実質から頭皮までの層を示す。

- (a) 脳実質 : 頭皮と脳脊髄液の中間の輝度値を持っており、既存のセグメンテーション技法により抽出が可能である。
- (b) 静脈 : 高輝度であり、本研究の対象である脳表静脈は脳実質の外側に存在している。
- (c) 腫瘍 : 脳実質に比べて高輝度であり、形状は不定形である。また、静脈と腫瘍は頭皮と輝度が類似するため、自動的な特定が不可能である。
- (d) 脳脊髄液 : 脳実質と頭皮の間に存在し、極めて低輝度である。また、頭皮と脳実質や腫瘍が密着する場合、判定が困難になる。
- (e) 髄膜 : 脳実質と同等かそれ以下の輝度値を持ち、脳脊髄液中に存在する。頭部 MR 画像は後頭部が高感度で造影されるため、後頭部が遮蔽されやすい。
- (f) 頭皮 : 高輝度であり、頭皮以外の組織を覆うように存在している。

2.3 (i) 頭皮の残存について

2.1(3) では脳実質の概形に対する膨張処理によって静脈を表示領域に加えていた。しかし、この膨張処理は一定回数の反復処理であるため、頭皮や脳脊髄液の判別が出来ず、部位によって過膨張が生じていた。

MR 画像中では、頭皮と脳表の間には低輝度の領域である脳脊髄液が存在する(図7)。そこで、この脳脊髄液を判別し、膨張処理の判定条件とすることで、頭皮の残存に対応する。

2.4 (ii) 髄膜の残存について

先行研究での結果画像は、脳脊髄液中に存在する低い輝度の判別・除去を行っていないため、低輝度領域が脳表を覆い、脳表を不明瞭にしまっていた。

先行研究で抽出したデータから脳実質を取り除くことで、脳実質に付加した情報を判別できる。さらに、脳実質に付加した情報から静脈・腫瘍を判別することで、脳表を遮蔽している情報を抽出する。

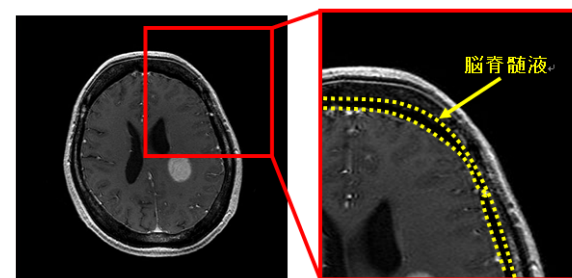


図7 脳脊髄液
Fig.7 Cerebrospinal fluid

2.5 (iii) 脳溝について

髄膜による遮蔽と造影剤の影響により脳溝が不明瞭となっている。さらに、ボリュームレンダリングという表示法の特徴として、画像内に陰影が現れないため、視認が難しくなっている。

MR 画像中において、脳溝は脳実質の表面構造であるため、抽出した領域の概形と脳実質との差分から脳溝を抽出できる。その上で、抽出した脳溝内を極端に低い輝度値に置き換えることで脳溝を強調する。

3. 提案手法

本章では、問題解決アプローチから具体的な提案手法について述べる。まず、MR 画像からの脳実質セグメンテーション技法²⁾により、脳実質を抽出する。その上で、先行研究³⁾に対して膨張条件を付与し、脳表可視化を行うことで頭皮を除去する。さらに、脳表可視化画像のヒストグラムを用いて髄膜の除去を行う。最後に、脳実質と脳実質の概形から脳溝を抽出し、脳溝強調を行う。以下に、(i) 頭皮の残存に対する膨張条件設定法、(ii) 髄膜の残存に対する髄膜除去法、(iii) 不明瞭な脳溝に対する脳溝強調法を述べる。

3.1 (i) 頭皮の残存に対する膨張条件設定法

頭皮と脳表の間には低輝度の領域である脳脊髄液が存在する。そこで、この脳脊髄液を判別し、膨張処理の判定条件とすることで、頭皮の残存に対応できる。

まず、動的輪郭法によって抽出された輪郭領域に対して膨張処理を行う。この処理には3次元の膨張フィルタを用いる。脳実質データを走査し、脳実質の近傍ボクセルの平均値を求める。元画像データにおいて脳実質の近傍ボクセルに平均値以上の値がある場合、そのボク

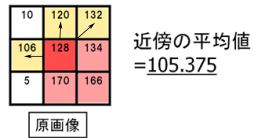


図 8 膨張の例

Fig. 8 A example of dilation

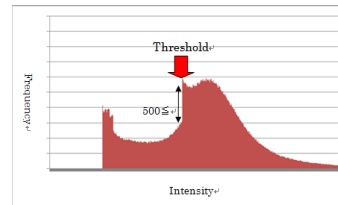


図 9 閾値設定

Fig. 9 Threshold setting

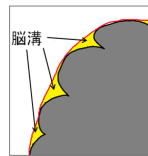


図 10 脳溝領域の定義

Fig. 10 Defining area of sulcus

セルを表示領域に加える．例として，図 8 のように輝度値が並ぶ場合，対象ボクセルの近傍の平均値は 105.375 であるため，106 以上の輝度を持つボクセルを表示領域に加える．

3.2 (ii) 髄膜の残存に対する髄膜除去法

従来手法で抽出したデータから脳実質を取り除くことで，脳実質に付加した情報を判別できる．さらに，脳実質に付加した情報から静脈・腫瘍を判別することで，脳表を遮蔽している情報を抽出できる．

まず，膨張結果から脳実質を除去し，得られた領域を追加情報領域と定義する．追加情報領域のヒストグラムを高い輝度値から走査し，出現数に 500 以上の差が出る輝度値を閾値とする(図 9)．追加情報領域において，得られた閾値を下回る輝度値を除去する．

3.3 (iii) 不明瞭な脳溝に対する脳溝強調法

抽出した脳実質の概形と脳実質との差分から脳溝を抽出できる．その上で，抽出した脳溝内を極端に低い輝度値に置き換えることで脳溝を強調することができる．

まず，動的輪郭法のひとつである Snakes⁴⁾ を用いて脳実質の大まかな輪郭を抽出する．Snakes の実装について，本研究では OpenCV⁵⁾ を用いた．初期輪郭について，初期輪郭を構成する頂点 $P_i = (X_i, Y_i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1, P_n = P_0$) の座標を以下の式 (1) と式 (2) で与える． n は頂点数を表す． $ImgWidth$ はスライス画像の幅であり， $ImgHeight$ はスライス画

像の高さである．また，連続エネルギーの重みは 0.005，曲率エネルギーの重みは 1.0，画像エネルギーの重みは 2.0 と経験的に設定した．得られた輪郭領域と脳実質の差分を求め，脳溝領域とする(図 10)．そして，脳表可視化画像において，脳溝領域にあたる輝度値を 10 に設定する．

$$X_i = 0.9 \times ImgWidth \times \frac{\cos(i \times \frac{2\pi}{n})}{2.0} + \frac{ImgWidth}{2.0} \quad (1)$$

$$Y_i = 0.9 \times ImgHeight \times \frac{\sin(i \times \frac{2\pi}{n})}{2.0} + \frac{ImgHeight}{2.0} \quad (2)$$

4. 実験と結果

本研究の提案手法について，実際に患者脳 MR 画像を用いて実験を行い，作業時間と結果画像の画質について評価した．MRI データは 3 例の患者データを用いた．本章では，実験の概要と結果画像について述べる．

4.1 実験環境

実験環境は以下の通りである．

CPU	: Intel Core i7 870 2.93GHz
RAM	: 8GB
OS	: Windows 7 Professional
入力データ	: 1 ボクセル輝度値 16bit 512 × 512 × 256 ボクセル
出力データ	: 1 ボクセル輝度値 16bit 512 × 512 × 256 ボクセル

4.2 実験の流れ

本手法の処理手順は以下の通りである．

- (1) MRI データから脳実質抽出手法を用いて脳実質データを作成
- (2) 手描き入力の情報を用いて腫瘍領域を定義し，脳実質データに含む
- (3) 動的輪郭法を用いて脳実質データの輪郭を抽出する
- (4) 脳実質データの輪郭内部を表示領域として膨張させる
- (5) MRI データと表示領域の共通部分を抜き出し，可視化画像とする

- (6) 可視化画像における追加情報領域から髄膜を除去する
- (7) 脳実質データの輪郭を用いて脳溝領域を定義
- (8) 脳溝領域の輝度値を 10 に設定

脳実質データの作成については、上野らの脳実質抽出手法²⁾を用いる。また、腫瘍輪郭の入力作業は手描き入力で行われており、その他の作業は自動で行われる。

4.3 実験結果

患者 A 図 11 に患者 A に対する実験結果画像を示す。この画像において、頭皮の残存が見られず、脳溝が強調されていることがわかる。しかし、静脈の欠落が発生しているため、静脈を完全に把握することができない画像となった。処理にかかった時間は 10 分 31 秒であり、このうち提案手法が占める時間は 31 秒であった。

患者 B 図 12 に患者 B に対する実験結果画像を示す。この画像において、静脈の欠落が無く、脳溝が強調されていることがわかる。しかし、脳が頭皮などに密着していることが原因で、頭皮の残存が見られた。処理にかかった時間は 11 分 7 秒であり、このうち提案手法が占める時間は 22 秒であった。

患者 C 図 13 に患者 C に対する実験結果画像を示す。この画像において、脳溝が強調されていることがわかる。しかし、腫瘍周辺に頭皮の残存が多く、腫瘍の大部分を遮蔽してしまっているため、腫瘍の状態を把握することが困難である。この原因として、腫瘍が頭皮に密着してしまっていることが挙げられる。処理にかかった時間は 10 分 39 秒であり、このうち提案手法が占める時間は 48 秒であった。

4.4 考察

患者 A と患者 B は腫瘍の影響による脳の変形が小さいため、頭皮の残存が少ない。患者 C は腫瘍の影響による脳の変形が大きく、特に腫瘍周辺に頭皮の残存が見られた。これは、脳の変形により脳や腫瘍が頭皮に密着し、脳脊髄液領域が不明瞭になったため、膨張処理が止まらなかったことが原因と考えられる。また、患者 A には静脈の欠落が見られたが、これは脳と静脈の間に隙間があったため、膨張処理が止まってしまったことが原因と考えられる。

4.5 評価

提案手法による成果の評価として、医師による主観評価と数値による客観評価を行った。本章では、提案手法により作成した画像に対する評価結果と、評価結果に対する考察を述べる。

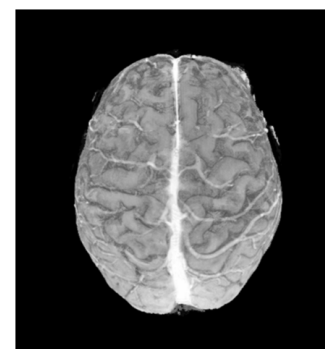


図 11 患者 A の結果画像
Fig. 11 A result of patient A

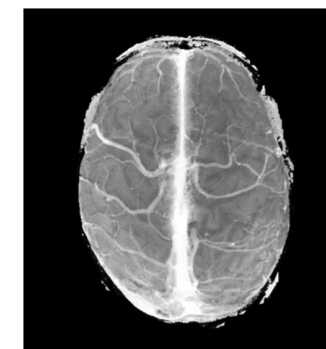


図 12 患者 B の結果画像
Fig. 12 A result of patient B

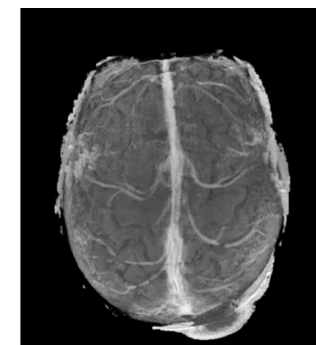


図 13 患者 C の結果画像
Fig. 13 A result of patient C

4.5.1 主観評価

提案手法により得られた結果画像に対して、医師による主観評価を行った。その結果、以下のような評価を得ることができた。

- (1) 頭皮・髄膜について
 - 腫瘍の影響で脳が変形していない場合は診断に使用可能である。
 - 腫瘍の影響で脳が変形している場合は診断に使用不可能である。

(2) 脳溝について

- 主要な脳溝が強調されていることがわかる。

頭皮・髄膜について、腫瘍の影響で脳が変形している患者脳に対しては良い評価を得ることができなかった。これは、脳の変形により、脳や腫瘍が頭皮に密着するため、脳実質や腫瘍と頭皮を輝度変化から判別できないことが原因である。

4.5.2 数値評価

放射線技師の手作業による可視化結果画像を評価基準とし、数値評価を行った。岩手医科大学の研究施設で使用されている、MRI 付属のワークステーションではポリウムデータを出力できないため、手作業での可視化画像のスクリーンショットを基に手作業結果画像のポリウムデータを再現する。その上で、手作業結果画像と提案手法結果画像の一致度 (Consistent Rate: CR) を以下の式 (3) で求める手作業での抽出部位を正しく抽出したものを真陽性 (True-Positive: TP) とし、逆に存在しないところを存在するとしたものを偽陰性 (False-Negative: FN) とする。

表 1 に示す評価結果から、提案手法は高い一致度を得られているが、画像は差異が大き

いことがわかる。原因として、手作業結果画像を完全に再現できていないことが挙げられるが、明らかになっていないパラメータが存在するため、手作業結果画像の完全な再現は不可能であると考えられる。

$$CR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

5. おわりに

本研究では、「可視化作業の時間短縮」を実現と、「可視化した脳表上の構造をわかりやすく医師に提示すること」を目的とし、頭部 MR 画像の構造的特徴を用いた脳表可視化法を提案した。先行研究の問題点であった頭皮の残存に対して、先行研究で使われていた膨張処理への条件付与により解決を図った。また、髄膜による遮蔽に対して、脳実質に追加した領域から不要な部分を判別することによって解決を図った。そして、動的輪郭法を用いて脳溝を強調した。医師の評価から、本手法が腫瘍の影響で脳が変形していない患者に対して効果的であることがわかった。

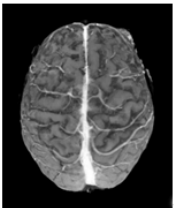
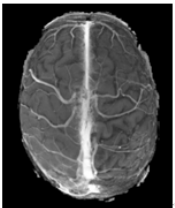
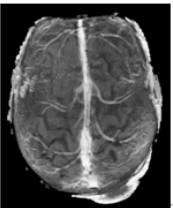
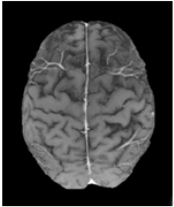
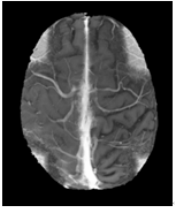
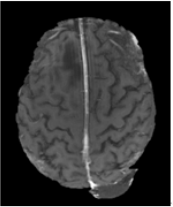
本手法では、腫瘍の影響で脳が変形してしまっている患者脳に対して、診断に使用可能な水準まで脳表可視化を行うことができない。これは、脳の変形により、脳や腫瘍が頭皮に密着するため、脳実質や腫瘍と頭皮を輝度変化から判別できないことが原因である。そのため、局所的な輝度変化を基に大局的な形状を求めることで、脳実質や腫瘍と頭皮を分離する指標を作る必要があると考える。

謝辞 本論文の執筆にあたり、有益な御助言と資料・データの提供を頂いた岩手医科大学超高磁場 MRI 研究施設および脳神経外科学講座の関係各位に心より感謝する。

参考文献

- 1) 坂東道夫, "Volume Rendering による脳表 MR Angiography の作成", MRI Today, Volume No.6, pp.15-18, 1999.9.
- 2) 上野育子, 亀田昌志, 井上敬, 小川彰, "3.0Tesla 高解像度 MR 画像からの脳実質抽出", 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J-89-D, no.1, pp.107-120, 2006.1.
- 3) 加藤潤一, 松田浩一, 藤原俊朗, 吉田忠弘, "手描き入力による脳表上静脈および腫瘍の可視化のための半自動 MR 画像編集法", 情報処理学会第 71 回全国大会, 4T-3, 2009.3.
- 4) M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active contour models," International Journal of Computer Vision, Vol.1, No.4, pp. 321-331, 1988 .
- 5) "OpenCV", <http://opencv.jp/>, 2012.1 現在.

表 1 数値評価結果
Table 1 A result of numerical evaluation

データ	患者 A	患者 B	患者 C
提案手法			
手作業			
一致度	92.5%	94.8%	88.9%