リアルタイム MR 画像ガイドにおけるオフセット型穿刺補助器具の開発

Offset-Type Assistive Devices for Image Plane Navigation in Real-Time MR Image Guided Surgery

森川茂廣（正会員）^{a*}，犬伏俊郎^a，来見良誠^b，仲 成幸^b，佐藤浩一郎^b，波多伸彦^c，
Viswanathan Seshan^d，Hasnine A Haque^d

^a滋賀医科大学 分子神経科学研究センター

^b滋賀医科大学 医学部

^c東京大学大学院 情報理工学系研究科

^dGE 横河メディカルシステム

Shigehiro Morikawa^{a*}，Toshiro Inubushi^a，Yoshimasa Kurumi^b，Shigeyuki Naka^b，Koichiro Sato^b，
Nobuhiko Hata^c，Viswanathan Seshan^d，Hasnine A Haque^d

^aMolecular Neuroscience Research Center, Shiga University of Medical Science

^bSchool of Medicine, Shiga University of Medical Science

^cGraduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^dGE Yokogawa Medical Systems

Abstract

In the MR-guided interventional procedures, an optical tracking system for the scan plane control plays an important role. Two types of new assistive devices for the system were developed, in which the needle guide was placed away from the center of the hand piece or its direction was changed. The system was modified to determine the image planes with the new path of the needle similar to the conventional setting. Since the needle guides were off-center, surgical instruments, endoscope or surgeons' hands did not disturb the image plane determination even during the procedures. One of them (torch type) enabled punctures from the sides of the patient, which were previously impossible. The errors caused by these devices were negligible. They were quite helpful to accomplish more accurate MR image guidance and to increase the availability of the MR-guided interventional procedures.

Key words

MR image guidance, Image plane navigation, Assistive device, MR-guided intervention.

1. はじめに

縦型オープン MR 装置の大きな利点は、術者がリア

ルタイム MR 画像をモニタしながら、それをガイドに低侵襲の治療操作を行なえることである^{1)~6)}。その手技のなかで最も基本的かつ一般的な操作は病巣の「穿刺」である。しかし、X線透視のような投影画像と異なり、ある特定平面の二次元 MR 画像を穿刺のガイドとするため、その撮像面は穿刺針の進行方向と正確に

*滋賀医科大学分子神経科学研究センター代謝情報制御部門
〒520-2192 大津市瀬田月輪町

一致し、なおかつ目標を補足していなければならない。こうした条件を実現するため、われわれのオープン MR 装置には、オブティカルトラッキング方式の撮像面ナビゲーション装置が備えられ、術者自身が撮像面をコントロールすることができるようになっている。

Fig. 1 A に示すようなハンドピースは、中心にニードルガイドを設置する穴があり、放射状に広がる 3 本の脚の先端に発光ダイオードが備えられ、そこからの光を術野の天井部分に設置された 3 個の検出器 (**Fig. 1 B**) で受光し、位置座標が求められ撮像面が決定される。したがって、この撮像面ナビゲーション装置は、非常に重要な役割を果たし、MR 画像ガイド下の穿刺にとって必要不可欠のものである。しかし、これを実際に臨床に使用する場面では様々の問題が発生した。

まず、このハンドピースには、わずかに磁性体の部品が含まれており、この部分やケーブルが患者の体表面に接触するとその近傍の MR 画像の信号が欠落してしまうことである。こうした影響は、ハンドピースを

対象から約 3 cm 離すことにより消失した。しかし、ハンドピースを体から 3 cm 浮かした状態で安定して固定し穿刺操作を行なうことは、ほとんど不可能であった。そこで、**Fig. 2** のように直径 10 cm のアクリルの筒を約 3 cm に切ったスペーサ⁷⁾を準備し、その上にハンドピースを載せて穿刺を行なった。角度をつけた穿刺が必要な場合には、あらかじめ何種類かの斜めに切ったスペーサを準備し、適当なものを選んで使用した。

しかし、これでは角度の微調整は困難であり、ハンドピースの固定に際しては、発光ダイオードを遮蔽しないように細心の注意が必要で、術者と助手の共同作

Fig. 1 An optical tracking system for image plane control. (A) A 3-point hand piece has a hole at the center for a needle guide and 3 light emitting diodes (LEDs, arrows) on the 3 pedicles. (B) Detectors (arrows) on the ceiling receive infra-red light from the LEDs and image planes are determined.

Fig. 2 Spacers made of an acrylic tube 10 cm in diameter. The puncture was carried out while fixing the hand piece on this spacer with an offset from the body surface. Several kinds of sloping spacers were prepared and selected by the puncture angle.

Fig. 3 An assistive device for the hand piece. The hemispherical adapter enabled flexible adjustments of the puncture angle while keeping an offset from the body surface. The handle having a window for a LED and a groove for the cable enabled easy and stable holding of the hand piece with one hand of a surgeon.

業が不可欠であった。そこで第2世代として、Fig. 3のような半球状のアダプタとハンドルからなる補助器具⁸⁾を樹脂で製作した。アダプタは有効半径3 cmで体表から離れた状態で角度を自由に調整した穿刺が可能であった。ハンドルには、発光ダイオードの窓とケーブルを挟み込むための溝が設けられ、発光ダイオードの遮蔽やケーブルの体表への接触の心配なくハンドピースを固定することができた。その結果一人の術者が左手でハンドルを把持し、右手で穿刺を行なうことが可能となった。これは患者へのアクセスにどうしても制限のあるこの治療において特に有用であった。

しかし、それでも検出器は術野の真上に設置され、発光ダイオードの中心を通して上方向から針を刺入し穿刺操作を行なうという構造上の問題から、ダイオードの遮蔽は操作中に必然的に起こり、最新の正確な撮像面に更新するためにいったん手を引いて待たなければならない場面が度々起こった。また、内視鏡⁹⁾、顕微鏡などの機器が術野に持ち込まれるようになり、発光ダイオードを遮蔽する要因も増加した。さらに、このハンドピースを用いて横方向からの穿刺を行なおうとしても、発光ダイオードが横方向を向いてしまい、天井部分の検出器では受光できず、ナビゲーションを行なうためには、患者の体位変換を要することも大きな問題であった。そこで今回は、これらの問題を解決するために、穿刺針の経路をハンドピースの中心から離し、あるいは穿刺の方向を変更した、第3世代ともいえるオフセット型穿刺補助器具を製作した。

Fig. 4 A double donut type open configuration GE SIGNA SP/i System. Two surgeons can access a patient from both sides while monitoring real-time MR images on the LCDs between the magnets.

2. 方法および製作した補助器具

MR装置は、超伝導タイプ 0.5T SIGNA SP/i (GE Medical Systems, Milwaukee, WI)で、ダブルドーナツと呼ばれる垂直開放型である(Fig. 4)。撮像面をコントロールするために FlashPoint Model 5000 (Image Guided Technologies Inc., Boulder, CO)が組み込まれている。穿刺には MR 対応穿刺針、生検針(Daum, Schwerin, Germany)を用いた。穿刺ガイドのためのリアルタイム MR 画像は、spoiled gradient echo (SPGR)を用いて、TR 14 ms, TE 3.4 ms, 256 × 128 matrix, スライス 7 mm, FOV 30 × 30 (または 24 × 24) cm² でおおよそ 2 秒に 1 枚の割合で撮像した。穿刺位置の calibration のためには、2%寒天末、0.25 mM Gd-DTPA を含む約 3 リットルのファントムを作成した。

穿刺補助器具は、超高密度ポリプロピレンを用いて穿刺針のガイドを中心から 15 cm 横方向に移動させた横オフセット型(Fig. 5 A)と穿刺方向を 90° 回転させ

Fig. 5 Two types of newly-developed assistive devices for MR image guided puncture. (A) A transverse offset type, in which the needle guide was transversely shifted at 15 cm from the center. (B) A torch type, in which the needle guide was shifted at 15 cm below the hand piece and rotated to the transverse direction.

なおかつ穿刺針のガイドを中心から 15 cm 下方へ移動させたトーチ型(Fig. 5 B)の 2 種類を作成した。それぞれの補助器具についてオフセットと穿刺方向の matrix を変更するための個別のファイル (tool file) を作成し、FlashPoint の制御コンピュータに導入した。

これらの穿刺補助器具によって生ずる誤差の評価のため、穿刺針の長さを 15 cm、ターゲットはマグネットセンターと仮定して、オリジナルの設定では、磁場中心の天井側 15 cm に、オフセットタイプの設定では、磁場中心の天井側 15 cm 患者の足側 15 cm と天井側 15 cm 患者の側方 15 cm の 2 ヶ所に、トーチタイプの設定では天井側 15 cm 患者の側方 15 cm の部位にハンドピースを固定し、それぞれの tool file 使用して、画像を撮像しながら、連続した 100 回の画像の中心の三次元座標軸の位置情報を記録した。

3. 結果

FlashPoint の tool file を変更することにより、ニード

Fig. 6 Adjustments of the image plane control with the new needle positions using an agar phantom. With both transverse offset type (A) and the torch type devices (B), new needle positions were shown with the cursor at the center of the real-time images.

ルガイドの位置をずらせた補助器具を用いた場合にも、従来と同様、針の進行方向に一致する平面で、針が左右の中心を上から下へ横切る撮像面で MR 画像を得ることができた(Fig. 6)。横オフセット型では、ニードルガイドに対してハンドピースを上下左右いずれの方向に位置させても、またトーチ型では左右どちらからアプローチしても同様の結果が得られた。連続した 100 回の位置情報の中心点からのずれの距離(絶対値)の平均 $\pm$ SD は、オリジナルの設定で 0.019 ± 0.010 mm であったのに対して、オフセットタイプ足側 0.065 ± 0.032 mm, 側方 0.094 ± 0.038 mm, トーチタイプ側方 0.070 ± 0.033 mm であった。

横オフセット型は、主として、肝腫瘍マイクロ波凝固壊死療法での腫瘍の穿刺に用いたが(Fig. 7 A), 全く発光ダイオードを遮蔽することなく、常に最新の位置情報を反映したリアルタイム MR 画像をモニタしながら一連の穿刺操作行なうことが可能となった。また、ハンドピース自体は穿刺部位から 15 cm 横方向に離れているため、ハンドピースによって引き起こされる MR 画像信号の欠落という影響は問題にならなかった。さらに、この補助器具は穿刺ばかりでなく、MR 画像ガイド下鼻内視鏡手術⁹⁾でも利用している(Fig. 7 B)。ニードルガイド挿入部分に内視鏡(硬性鏡)の鏡筒を挿入しても、内視鏡の根元に取り付けられた CCD カメラによる発光ダイオードの遮蔽をきたさず、内視鏡の向かう方向に正確に一致した MR 画像が得られ、内視鏡で観察している表面情報と MR 断層画像による深部の情報が統合され有効な治療を行なうことができた。一方、トーチ型の補助器具は、MR 画像ガイド下の肝腫瘍の側方からの穿刺(Fig. 7 C)や脳腫瘍の頭頂部方向からの穿刺(Fig. 7 D)に用いた。穿刺操作は常に発光ダイオードより下方で行なわれるため、遮蔽の問題も生じなかった。

4. 考察

今回の補助器具のオフセットの長さは、手の握り幅がおおよそ 10 cm あり、手による遮蔽を避けるとともに器具の把持を容易にするために、15 cm に設定した。もちろん、tool file を書き換えることによりどのような距離でも対応は可能であるが、磁石の間のスペースで実際に使用してみても適当な長さと考えられた。しかし、発光ダイオードの中心部分と穿刺部分の間に、こうしたオフセットをかけることにより、誤差が大きく

なる可能性が懸念された。実際、今回作成したオフセット型、トーチ型の補助器具の設定では、穿刺針が中心を通る場合のオリジナルの設定に比べて誤差は 3～5 倍に増加した。この誤差の増加は、オフセットをかけたことによる「ハンドピースと検出器の位置関係」と「ハンドピースとターゲットの位置関係」の変化に起因するものと考えられる。しかし、増加したといっても誤差の絶対値の平均は 0.1 mm 以下で實際上全く問題は生じなかった。現実には、穿刺針の「たわみ」などのメカニカルな誤差のほうが遥かに大きいと予想されるが、こうした誤差は補助器具のデザインには直接依存するものではないと思われる。実際には、穿刺針の進行方向を含めた互いに直行する 2 平面で撮像を行ない、どちらの面でも、常に穿刺針全体が撮像面に正確に含まれ、かつ中央に位置することを確認しており、臨床使用に当たっても常に MR 画像に描出される穿刺針をモニタしながら治療を行なうため、治療中に

補助器具から生ずる誤差による危険を心配する必要も発生しなかった。

穿刺針を進める場合、針の切っ先の形状、組織の特性、呼吸運動などの要因で正確に直進するとは限らない。通常、肝腫瘍に対するマイクロ波凝固では、3 cm 程度の腫瘍でも何度も穿刺と凝固を繰り返す必要がある。MR 画像上のガイドのカーソルからわずかに針が逸れたとしても、腫瘍に到達していれば、あえて細かな軌道修正を行わず、ハンドピースを穿刺針に追従させることによって、撮像面を修正し、正確に針の進行方向を含む MR 画像をモニタし、凝固治療の部位を確認するようにしている。従来は、手元の操作中に発光ダイオードを遮蔽した場合、最新の針の方向に一致した撮像面に更新されるよう、いったん操作を中断し、遮蔽を起こしている術者の手を引いて待つ必要があった。しかし、この 2 種類のオフセット型穿刺補助器具により、遮蔽を起こさず一連の操作を行なえるように

Fig. 7 The actual uses of the newly-developed assistive devices. (A) Using the transverse offset type device, an electrode for the microwave thermocoagulation was inserted into a liver tumor. Such procedures did not disturb the visibility of the LEDs. (B) The transverse offset type device was used in an endoscopic nasal surgery. The scope was fixed at the needle guide position and image plane was determined by the scope. (C) Using the torch type device, a liver tumor was punctured from the side of the patient. Since the procedures were carried out below the hand piece, the visibility of the LEDs was well maintained. (D) The torch type device was used for the puncture of a brain tumor in the parietal region. In this case, the patient table was inserted from the side of the magnet.

なり、常に最新の情報が反映されるため、正確であるばかりでなく迅速な穿刺が可能となり、非常に有効であった。トーチ型の補助器具は、患者の体位変換を行わずに横方向からの穿刺を可能とした。この装置の患者ベッドには、ヘッドアップやローテーションといった手術台のような自由な可動性が備えられていないため、穿刺方向の自由度が増すことは、限られた空間の磁石内での治療の適用可能領域の拡大にも繋がるものである。さらに、穿刺操作ばかりでなく内視鏡とハンドピースを組み合わせることも容易となり、MR 画像と内視鏡画像が有機的に統合され、新たな治療手技の開発にも貢献している。

この MR 装置は、欧米では脳外科症例を中心に運用されており、脳腫瘍の穿刺のためには、ハンドピースを頭蓋骨にしっかりと固定して生検を行なう補助器具が考案され¹⁰⁾すでに市販されている。しかし、体幹部など他の部位の穿刺についてはほとんど考慮されていないのが実情である。肝腫瘍など他の疾患部位へ適応を拡大していこうとすれば、このような補助器具を独自に開発することが是非とも必要であり、また一方でこうした補助器具が改良されてより使いやすくなれば、自ずと MR 画像ガイド下の治療の適応範囲も拡大することが期待される。

5. 結語

手術ガイド用縦型オープン MR 装置、SIGNA SP/i に備えられている撮像面ナビゲーションシステムに 2 種類のオフセット型穿刺補助器具を考案、製作した。ニードルガイドの位置を中心から移動させることにより、発光ダイオードの遮蔽の問題は解決し、常に最新の位置情報を反映した画像をガイドとして正確で迅速な穿刺が可能となり、またナビゲーションの自由度が増し治療手技の拡張にもつながった。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会、科学研究費補助金 (13671227) によって行なわれた。

文献

1) Schenck JF, Jolesz FA, Roemer PB, Cline HE, Lorensen WE, Kikinis R, Silverman SG, Hardy CJ, Barber WD, Laskaris ET. Superconducting open-configuration MR imaging system for image-guided therapy. Radiology 1995; 195: 805-814.

2) Hol PK, Kvarstein G, Viken O, Samedby Ö, Tønnessen TI. MRI-guided celiac plexus block. J Magn Reson Imaging 2000; 12: 562-564.

3) Law P, Gedroyc WMW, Regan L. Magnetic resonance-guided percutaneous laser ablation of uterine fibroids. J Magn Reson Imaging 2000; 12: 565-570.

4) 森川茂廣, 犬伏俊郎, 松田昌之, 来見良誠, 藤村昌樹, 野坂修一, 村田喜代史, Viswanathan Seshan. インターベンション治療における縦型オープン MR 装置の初期経験. 日磁医誌 2001; 21: 41-48.

5) 来見良誠, 谷徹, 花澤一芳, 仲成幸, 小玉正智, 馬場忠雄, 村田喜代史, 野坂修一, 森川茂廣, 犬伏俊郎. リアルタイム画像を用いた垂直アクセスによる MR ガイド下肝腫瘍マイクロ波凝固壊死療法. 臨外 2000; 55: 1199-1202.

6) 来見良誠, 仲成幸, 遠藤善裕, 花澤一芳, 谷徹, 森川茂廣, 犬伏俊郎, 山崎道夫, 古川顕, 村田喜代史, 石塚義之, 馬場忠雄, 野坂修一. 垂直型オープン MR 装置を用いた MR ガイド下肝腫瘍治療. 日磁医誌 2001; 21: 170-180.

7) 来見良誠, 谷徹, 仲成幸, 目方英治, 田村祐樹, 小玉正智, 石塚義之, 新谷寛, 馬場忠雄, 山崎道夫, 古川顕, 村田喜代史, 森川茂廣, 犬伏俊郎. MR ガイド下肝腫瘍穿刺術におけるスパーサーの有用性. 肝臓 2000; 41: 507-508.

8) 森川茂廣, 犬伏俊郎, 来見良誠, 仲成幸, Viswanathan Seshan. リアルタイム MR 撮像ナビゲーション装置用補助器具の開発. 日磁医誌 2001; 21: 193-197.

9) 森川茂廣, 犬伏俊郎, 鈴木幹男, 来見良誠, 藤村昌樹, Viswanathan Seshan. MR 対応内視鏡システムの構築とその臨床応用. 日磁医誌 2001; 21: 155-160.

10) Kollias SS, Bernays R, Marugg RA, Romanowski RT, Yonekawa Y, Valavanis A. Target definition and trajectory optimization for interactive MR-guided biopsies of brain tumors in an open configuration MRI system. J Magn Reson Imaging 1998; 8: 143-159.