14-143-4 垂直磁場型 MR 内における肝腫瘍焼灼手術用穿刺ロボット

Needle Guiding Robot with Five-bar linkage for

MR Guided Thermotherapy of Liver Tumor

○小原 太*, 波多 伸彦*, 橋本 隆二*, 橋爪 誠**, 土肥 健純*

*東京大学 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

**九州大学 医学部 先端医工学診療部

*Futoshi Ohara, Nobuhiko Hata, Ryuji Hashimoto, Takeyoshi Dohi, Department of Mechano-Informatics,

Graduate School of Information Science and Technology the University of Tokyo

**Makoto Hashizume, Graduate School of Medical Sciences, Kyushu University

1 はじめに

核磁気共鳴診断画像装置 (MRI) は他の画像診断装置と比較して軟部組織の鮮明な画像が得られる, 温度モニタリングが行えるなどの点において利点が多い¹⁾. さらに近年, Open MRI の登場によって術中 MRI を用いた手術が主流となってきている. 術中 MRI を用いる手術として, 肝臓がん手術のマイクロ波凝固療法やラジオ波凝固療法が挙げられる. これらの手術方法は, 肝臓がんの腫瘍に針の穿刺を行い, その針先端からマイクロ波, あるいはラジオ波を照射して腫瘍を焼灼する手術方法で, Open MRI による術中 MRI 誘導下で手術を行うことでより正確な穿刺と腫瘍の焼灼を行うことが期待できる.

現在開発されている Open MRI として, 垂直磁場型と水平磁場型の2種類があるが, 導入コストの低さから垂直磁場型の MRI が一般的に普及している. しかし, 垂直磁場型の MR は患者が挿入されるガントリースペースが上下方向にせまく, 術者が実際に手術を行うのは困難である. 現在, 多くの MR 対応ロボットに関する論文が発表されているが, 多くは Closed MRI 用か水平磁場型 Open MRI 用である^{4),5)}. そこで, 本研究では最も普及している垂直磁場型 Open MRI 対応で, この限られたガントリースペース内でも有効に穿刺を行うことを考える. 穿刺に関しては, 上下スペースが限られているため, 患者の横方向から穿刺を行うことを想定し, 5 節リンク機構とジンバル機構を用いてコンパクトなロボットで穿刺針の姿勢制御を行うのに十分な自由度を実現する.

2 方法

2.1 5 節リンク機構とジンバル機構

本ロボットは穿刺針を保持し, 穿刺経路を決定するために穿刺針の姿勢の制御を行う. この穿刺針の制御を行うために 5 節リンク機構を用い, 穿刺針は Fig.1 に示すように 5 節リンク機構先端部に取り付けられたジンバルと固定端の先端部に取り付けられたジンバルの 2 ヶ所で保持を行う.

5 節リンク機構は 4 本のリンクからなる閉リンク機構で, Fig.1 中に 'five-bar linkage' として示してある. これは図中の 'actuated points' を回転させることによって 'link

tip' を水平面上で一意的に位置決めすることができる.

ジンバル機構は図中の 'gimbal' として示す機構で, 'needle' の回転 2 方向をフリーにした保持が行える. さらに, 'fixed edge' の先端に取り付けた gimbal は needle の直動方向のスライドを固定し, 逆に five-bar linkage 先端に取り付けた gimbal は needle の直動方向のスライドをフリーにした. これにより 5 節リンクが駆動を行うことによって針は固定端先端のジンバルを回転中心として姿勢を変化させることができる.

Fig.1 Five-bar linkage mechanism and gimbal mechanism

2.2 ロボットのサイズ

以上の仕様にに基づき製作したロボットを Fig.2 に示す. ロボットの高さは MR ガントリ高さ 420 [mm] という制限に対して, 最も低い時で 170 [mm], 最も高い時で 240 [mm] なので, 針の長さを 300 [mm] と仮定した場合, 針は水平面に対して最大で 36 [degrees] 傾ける事ができる. リンク長さは actuated points と連結されている側は 75 [mm], link tip で連結している側は 95 [mm] として製作しており, link tip は superior-to-inferior 方向に 110 [mm], left-to-right 方向に 92 [mm] のストロークを持っている.

本ロボットは 3 つのモータ駆動の自由度を持っている. うち 2 つの自由度は 5 節リンクの駆動を行うためのもので, 超音波モータ (USR30-E3N, 新生工業) により駆動を行い, モータに内臓のエンコーダの分解能は 360/2000 [degree] である. もう 1 つの自由度は 5 節リンクを取り付けたステージの上下を行うためのもので, 送りねじと超音波モータ

(USR60-E3N, 新生工業) により駆動を行う (ストローク : 70 [mm], 分解能 : 2 [μ m]).

また本ロボットは他に 3 つの passive な自由度を持っている。1 つは針の直動方向のスライドであり、術者によって手動で行われる。もう 1 つは fixed edge の上下であり、70 [mm] のストロークを持っている。最後はロボット全体の体軸方向へのスライドであり、肝臓全体を穿刺可能にするため 250 [mm] のストロークを持っている。

Fig.2 MR compatible needle holding robot

2. 3 MR 対応の材料・駆動源

本ロボットは MR ガントリ内で用いるため、磁場によって本ロボットが力を受けてはいけない、かつ本ロボットが磁場を乱して MR 画像に影響を与えてはいけない。以上を満たす材料として、ステンレス・樹脂・セラミックス・アルミニウムを用いた。具体的には直動ユニットにおける送りねじやガイドレールにはステンレス、摺動を行う部分のプッシュと送りねじのナット部分に樹脂、送りねじの軸受けの一端のベアリングにセラミック、その他の構成部分にアルミニウムを用いた。

MR 対応の駆動源として上記で挙げた非磁性仕様超音波モータ (USR30-E3N & USR60-E3N, 新生工業) を用いた。

3 評価

3. 1 針先端位置決め精度の評価

針先端の位置決め精度を評価するため、2 点に対してそれぞれ 10 回ずつ針先端を移動させ、ロボット上方に設置したマイクロスコープ (VH-7000C, KEYENCE) により得た画像をもとにその位置決めの再現性を求めた。得られる画像の分解能は 0.07 [mm] であり、それにより求めた位置決めの標準偏差は 0.07 [mm] と 0.14 [mm] だった。

3. 2 MR compatibility の評価

本ロボットが MR 画像に与える影響について測定、評価を行った。ファントムとしてポリエチレン容器に NaCl, MnCl₂ の混合液を入れたものを用いた。MR 画像は gradient field echo で撮像し、各パラメータを TR/TE : 50/20 [ms], FOV : 256 [mm], matrix : 256×128, スライス厚 : 10 [mm], フリップ角 : 90 [degrees]として、以下の 4 条件のもと 5 回ずつ撮像を行った。

Condition1 : ファントムのみ

Condition2 : ロボットを MR 内に設置し、モータの電源は OFF

Condition3 : ロボットを MR 内に設置し、モータ 1 つを駆動

Condition4 : ロボットを MR 内に設置し、全モータを駆動 (リンクを駆動)

画像に与える影響を評価するため、以下の式を用いて S/N 比を求めた。

$$S/N \text{ ratio} = I_{\text{center}} / SD_{\text{corner}}$$

I_{center} は画像中心 (ファントム部分) の直径 120 [pixel] 輝度の平均値であり、 SD_{corner} は画像の 4 隅 (ファントムが映っていない部分) それぞれについて求めた直径 60 [pixel] の輝度の標準偏差の平均をとったものである。S/N 比の最大減少幅は Condition4 の時の 19.4 % だった。得られた画像とそれぞれの S/N 比を Fig.3 に示す。

Fig.3 MR image and S/N ratio

4 結論

垂直磁場型 Open MRI 対応の肝腫瘍穿刺ロボットを製作した。上下スペースの限られたガントリ内で穿刺針の姿勢制御を行うため、5 節リンク機構とジンバル機構を用いた。針の穿刺可能ストロークは 110 [mm] × 92 [mm] × 70 [mm] を実現した。

針先端の位置決めは、標準偏差が 0.07 [mm] から 0.14 [mm] となり、高い標準偏差を示した。本ロボットの MR compatibility の評価では、S/N 比の最大減少幅が 19.4 % 程度にとどまり、高い S/N 比を示した。

5 謝辞

本研究は NEDO の助成を基に行われたものである。

参考文献

- 1) Kettenbach J, Silverman SG, Hata N, et al. Monitoring and visualization techniques for MR-guided laser ablations in an open MR system. J Magn Reson Imaging 1998;8:933-943
- 2) Masamune K, Kobayashi E, Masutani Y, et al. Development of an MRI-compatible needle insertion manipulator for stereotactic neurosurgery. J Image Guid Surg 1995;1:242-248
- 3) Chinzei K, Miller K. Towards MRI guided surgical manipulator. Med Sci Monit 2001;7:153-163