

低侵襲胎児治療のための集束超音波位置決め装置の開発

Development of HIFU positioning device for less invasive fetal treatment

○来間一郎¹, 桑名健太¹, 正宗賢¹, 山下紘正², 千葉敏雄², 土肥健純¹

1. 東京大学大学院情報理工学系研究科

2. 国立成育医療研究センター 臨床研究センター

Ichiro KURIMA¹, Kenta KUWANA¹, Ken MASAMUNE¹,
Hiromasa YAMASHITA², Toshio CHIBA², Takeyoshi DOHI¹

Abstract: The purpose of this research is to develop a HIFU positioning system to perform less invasive fetus surgery such as sacrococcygeal teratoma. The disease is fatal, for it varies bloodstream of a fetus, thus, the method of high intensity ultrasound(HIFU) is considered suitable to cauterize the vessels which provide the tumor with blood less-invasively. As for the target vessel it can be located by a 3D-ultrasound probe, so the HIFU transducer should be equipped with a 3D-ultrasound probe. In addition, as it is necessary to move the HIFU transducer and position the HIFU focus on the target, we developed the robotic device which has 4 degrees of freedom (three of them are translation, the other is posture of the 3D-ultrasound probe). It is proved that the device has adequate accuracy, speed and moving range, in addition to safety to patients and convenience for setup.

Key Words: HIFU, sacrococcygeal teratoma

1. 背景

胎児期仙尾部奇形腫は、胎児の腰部に巨大な腫瘍ができ、血流がそちらに集中することで胎児の体に負担がかかる疾患であり、命に関わる可能性が高い。現状では開腹手術により腫瘍を切除する治療法が一般的だが、この手法は侵襲性が高く、母子ともに負うリスクが大きい点が問題視されている¹⁾。そこで、集束超音波 (High Intensity Ultrasound: HIFU) を体外から照射し、腫瘍に血液を供給している血管を焼灼することで腫瘍の成長を阻害する治療法が提案されている (Fig. 1)。

しかし、この治療法の実現には、母体の呼吸や子宮内胎児の浮遊によって移動する患部を追従し、径1~3mm程度の血管にピンポイントにHIFUの焦点を合わせることが必要になる。

現在開発中のHIFU照射装置は、3Dの超音波プローブを備え、リアルタイムで目標の位置を捉えることができる²⁾。また、フェイズドアレイ式のHIFUトランスデューサにより、長径24mm、短径12mmの楕円体状の範囲内で焦点位置を移動することができる。これらの装置を前述の治療に適用するにあたり、より広い焦点移動範囲が必要となるため、HIFU照射装置を位置決めする機構が必要になる (Fig. 2)。

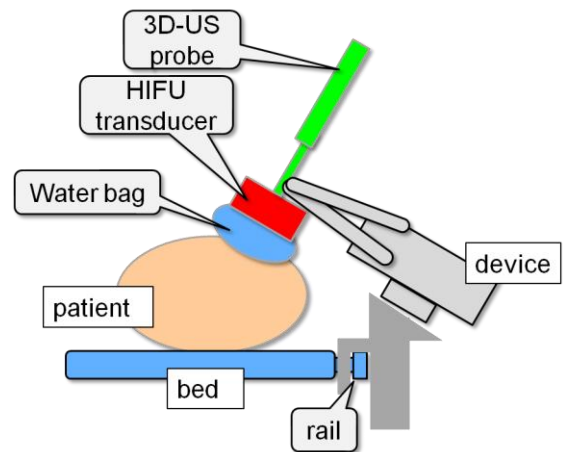


Fig. 2 The overview of the treatment

2. 目的

本研究では、胎児期仙尾部奇形腫のHIFU治療においてHIFU照射装置を移動可能な位置決め装置の開発を目的とする。

3. 要求仕様

自由度については、焼灼目標となる血管がフェイズドアレイによる焦点可動範囲内に位置するようにHIFU照射装置を移動させなくてはならないため、並進3自由度が必要となる。動作範囲は、母体腹部の接面上の100mm×100mm、奥行き50mmの直方体領域とする。動作時の速度は最大で10mm/sとし、位置決め精度については、超音波画像の解像度と同程度の1mmと設定する。

加えて、3D超音波プローブ部のみを軸周りに回転する自由度が必要となる。これは、プローブの走査断面を変更するためのもので、適切な方向に設定することでスキャン範囲を減らすことができ、3D画像の更新頻度を高めることができると考えられる。

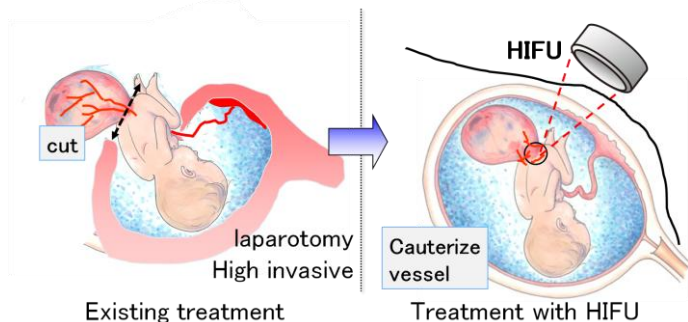


Fig. 1 Innovation of the treatment by HIFU

また、できる限り小型軽量とし、アクチュエータ部分は患者から遠ざけた配置にすることが望ましい。減菌・洗浄については、開腹手術ほどの高度な減菌は必要としないものの、HIFU 照射装置は容易に取り外し可能であることが求められる。

実用性の観点からは、特別な機器を使用せず、USB 接続で PC から操作できるインターフェースが望ましい。

4. 機構の選定

並進 3 自由度の配置の方法については、3 自由度直列、3 自由度並列、2 自由度並列+1 自由度の 3 種類が考えられる。多自由度を並列に配置するほど、剛性・出力や、重量を根元側に集中できるといった点で有利であるが、構造が複雑化し、特に先端の姿勢を維持する平行リンクの重量増加・精度低下が懸念される。そのため、並列配置の利点と、シンプルな構造のバランスをとり、2 自由度並列+1 自由度を採用する。

並列 2 自由度を実現する構造としては、リンク角度指定、リンク長指定、リンク端点位置指定の 3 種類が考えられる。長さ指定方式は、可動部に直動機構を搭載する性質上、可動部の重量と複雑さが問題になる。角度指定方式は、アクチュエータ周りのコンパクトさに優れるが、リンク数などから精度・可動部重量の点で劣る。端点位置指定方式は、根元部のサイズ以外の欠点がないため、これを採用する (Fig. 3)。端点位置の駆動範囲としては、2 つの直動機構を平行に配置したものとする。ただしこの形状では、要求される移動範囲の上下に冗長な動作領域が生じ、HIFU 照射装置を患者に近づけすぎると危険な動作が起こりうる。これを確実に防ぐため、ハードによって動作を制限する仕組みを追加する。具体的には、リンク先端の上下動は 2 つの直動機構の相対位置によって決定されるので、この相対位置の範囲を制限するストップを取り付ける。

並列 2 自由度と残る 1 自由度の配置順としては、先端側に単純軽量のリンクのみを配置できること、アクチュエータを根元側に集中できること、全体のサイズを小さくできることから、並列 2 自由度の先端側配置を選択する。

3D 超音波プローブの軸周り回転については、大きなトルクを必要とせず、小型のアクチュエータでも十分な出力を得られること、またデバイス根元側から動力を伝達するには複雑な機構が必要となることから、HIFU 照射装置の先にアクチュエータを配置して直接駆動するものとした。

以上の検討より、機構を Fig. 4 のように決定する。また、制御の容易さから、アクチュエータにはステッピングモータを使用する。

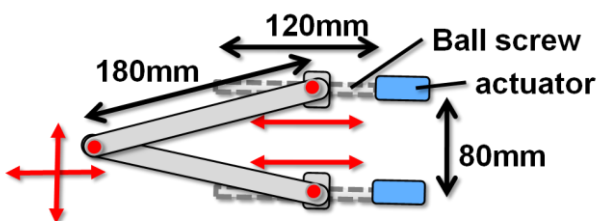


Fig. 3 The way to make 2 DOF

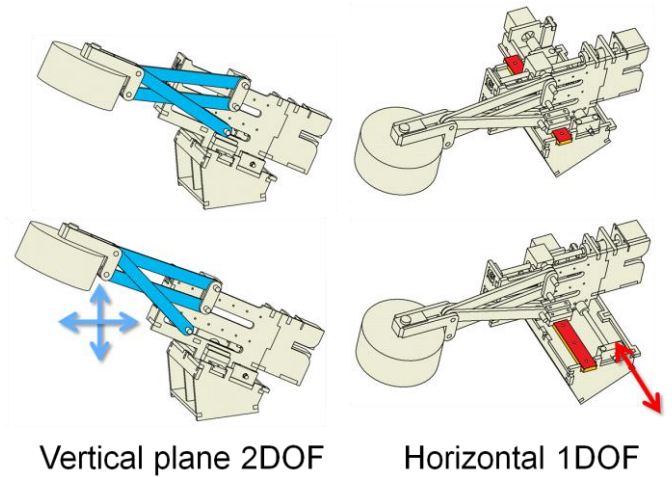


Fig. 4 The overview of the device

5. 評価

製作した装置に HIFU 照射装置の模型を取り付け、目標となるリンク先端位置から逆算して駆動したときに、十分な精度で位置・姿勢を制御可能であることを確認した。

6. 結論

本研究では、HIFU を用いる胎児期仙尾部奇形腫治療のための位置決め装置を製作した。製作した装置は要求仕様を満たしており、目的である HIFU 照射装置の位置決めに適応可能である。

参考文献

[1] 千葉敏雄, 胎児外科, 日本評論社, 2007.
 [2] 山下紘正, 他, 胎児心疾患治療のための 2D 超音波画像誘導による集束超音波自動照射システムの開発, 第 6 回生活支援工学系学会連合大会講演予稿集, p.156, 2008.