

CT透視下IVR用針穿刺ロボットにおける 穿刺支援機能の開発

松野隆幸（岡大），亀川哲志（岡大），平木隆夫（岡大），杉山晃平（岡大），
長尾明哲（岡大），木村和志（岡大），石井創（岡大），見浪護（岡大）

1. はじめに

CT透視画像やX線透視画像等，画像診断技術を用いて針やカテーテル等を体内に挿入し，経皮的に治療を行うInterventional Radiology (IVR, IR) という手術法がある．CTは視認性，客観性に優れ，CT画像をリアルタイムに表示できるCT透視システムはIVRのガイディングツールとして極めて有用であるとされており，CT透視下で針を穿刺して行うIVRは肺がん治療，肝臓がん治療，生検術をはじめ，様々な治療に応用されている．従来の外科手術と比較すると低侵襲であるため，局所麻酔での治療が可能であるというメリットがある．また，術後3日から4日で退院できるという事例が多く，近年，IVR手術への注目が高まっている．現在，IVRは人間が用手にて行っている．標的となる悪性腫瘍は小さいもので直径数mm程度のものであるため [1]，術者は慎重かつ正確に針の位置決めを行わなければならない．加えて，術者はCTガントリーの近くで手技を行うため，透視中に発生する放射線によって術者が被曝してしまうという問題が懸念されている．放射線被曝を防ぐために防護服を着衣したり鉗子を使用したりする工夫がされているが完全に被曝を防ぐには至っていない．そこで，針の位置決め精度の向上を行い，かつ術者の放射線被曝を低減するためのロボットとしてAcubot [2]，CTbot [3]，MAXIO [4] などが開発されている．しかし，そのほとんどがガイドによる医師の穿刺支援を目的としたロボットである．そこで，我々が開発する遠隔操縦可能な穿刺ロボットである Zerobot は，設置してから針を穿刺するまでのすべての過程を遠隔操縦により行う，ロボティックIVRの実現を目指している．本論文ではこれまでの成果と現在開発中である穿刺支援機能について述べる．

2. Robotic IVR の概要

2.1 要求事項

現在のIVR手術では医師が手で針を操作して手術を行っている [1]．ロボティックIVRでは，従来のように医師が手で針を操作するのではなく，ロボットを遠隔操作することによってIVR手術を行うことを目指す [5]．従来の肺がん治療におけるIVRは，CTガントリーと呼ばれるX線を発生させる円筒状の穴の中に患者が入った状態で，医師が用手にて手術が行われている．ロボティックIVRの実現のためには，ロボットはCTガントリー内で作業を行えるサイズである必要がある．ガントリーのサイズは直径720mmあり，ベッドの高さと人間が寝ている状態を想定すると，ロボットの作業空間は身体から240mm程の範囲である [6]．ま

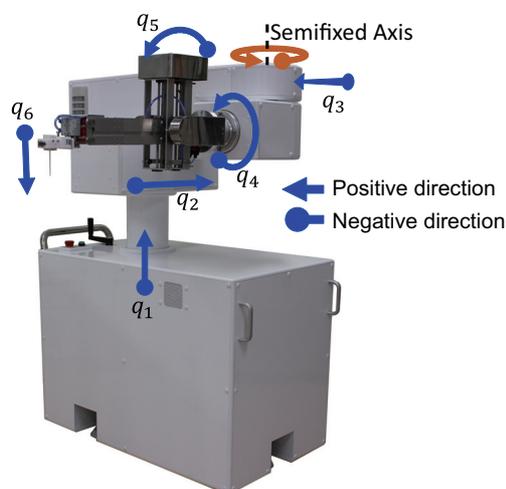


図1 Zerobotの外観と駆動軸の配置

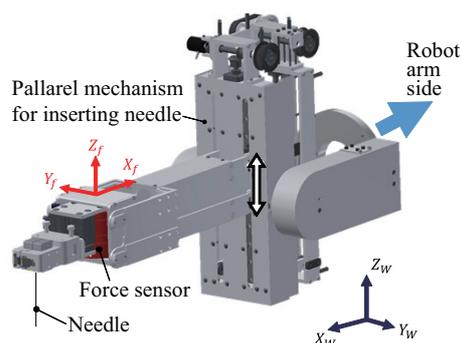
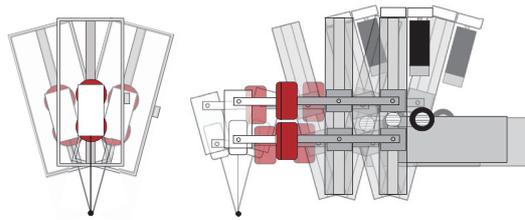


図2 エンドエフェクタの外観と力センサの配置

た，針を穿刺する前には，針をどこからどのように穿刺するかを決めるプランニングと呼ばれる作業がある．このことから，針の先端位置だけでなく，針を穿刺する姿勢も任意に制御できる必要があると考えられる．針はヨー軸に対象な形をしているため，上記のことを満たすロボットによる針の位置姿勢制御にはヨー軸を除いた5自由度が必要であると言える．

次に，IVRロボットを試作する上で考慮すべきなのがアーチファクトである．アーチファクトとは，実際には存在しないが，画像生成の際に発生してしまう虚像のことであり，アーチファクトによって腫瘍が見えなくなってしまう可能性がある．アーチファクトには，メタルアーチファクトやビームハードニングアーチファクトなどの種類があり，さまざまな要因によって発生する．メタルアーチファクトは，CTスキャン内にX線吸収係数 (CT値) の高いとされる金属が存在すると



(a) Remote center motion on CT-scanning plane (b) Remote center motion on sagittal plane

図3 リモートセンター動作

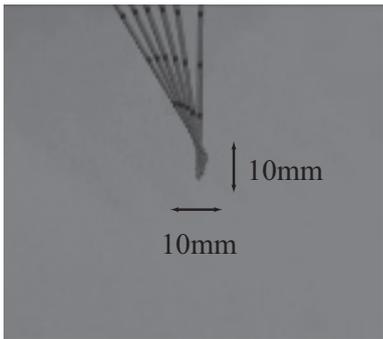


図4 リモートセンター動作中の針先画像

発生するアーチファクトのことである．X線吸収係数の高い物体が存在すると，X線を発生させても物体周辺ではX線検出データが極端に変化してしまう．これによって，正しい検出データが得られず，アーチファクトの発生したCT画像が生成される．CTガントリー内にロボットが入った状態で手術を問題なく遂行させるためには，アーチファクトの発生は抑えなければならない．そのため，CTガントリー内には極力金属部品が含まれないような構造であるが必要である．

2.2 Zerobot

我々が開発している Zerobot の外観を図1に示す．針先の位置，針の姿勢に5自由度，穿刺方向に1自由度を持つ構成となっており，図中の q_1, q_2, q_3 は互いに直交する直動関節， q_4, q_5 は把持している針の姿勢を変更する回転関節， q_6 は穿刺動作を行う直動関節である．図2にエンドエフェクタの機構図を示す．CT装置の仕組み上，ガントリー内に金属部品が存在するとアーチファクトと呼ばれる存在しない像が現れ，手技に支障をきたしてしまう．そのため，針の把持部には放射線透過性を示す樹脂を使用している．また，エンドエフェクタに平行リンク機構を採用することで，CT撮像断面から穿刺用モータ，角度変更用モータを離して設置している．針を把持するアタッチメントの手前には力覚センサが2つ設置されている．これは一方の力覚センサが壊れても異常検出により発見し，手術に致命的なリスク事象を起こさないためである．力覚センサは図中の X_f, Y_f, Z_f 軸方向の力 [N] と軸周りのモーメント [Nm] を測定することができる．これにより，穿刺時に皮膚や体組織から受ける反力を測定する．

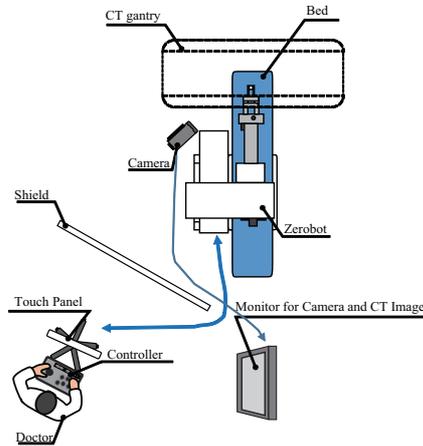


図5 システム構成

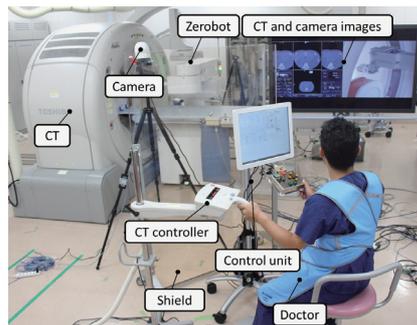


図6 ファントム実験の様子

2.3 リモートセンタ機能

テレオペレーション操作で動作する Zerobot では，針先中心での制御はほぼ必須の機能である．図3に示す姿勢変更を針先中心で行う制御はリモートセンタと呼ばれ，針先の動きにより意図せず患者の体表を傷つけたり，誤って穿刺してしまう等のリスクを抑える為，Zerobot に実装されている [6]．この機能は主に穿刺直前の微調整時（針の方向を腫瘍に向ける際）に用いられる．針の方向と標的腫瘍位置の関係は，CT画像を撮影することで医師にフィードバックされる．この時，術者が針の方向を把握する為には必ずCT断面上に針の全長が存在していなければならない．これを踏まえると，操作性の観点からリモートセンタによる針の回転はCT断面上で行われる必要がある．穿刺経路計画によってはCTガントリーを傾ける事があり，CT断面は必ずしも地面と垂直な関係にはない．また，図4にリモートセンタ動作中の針先の写真を示す．垂直状態から30度まで傾けたときの針先は10mm正方の領域に収まっていることが確認できる．針が自重でたわむ影響があるため，剛体と仮定して逆運動学を解いても針先の位置は一点には収まらない．

3. 精度検証試験

現在開発している CT-IVR ロボットの穿刺精度を確認するためファントム（疑似人体模型）を用いた実験を行った．図5にファントム実験におけるシステム構成を示し，図6にCT装置下でのファントム試験の様子を示す．ファントム試験におけるロボット挿入および用

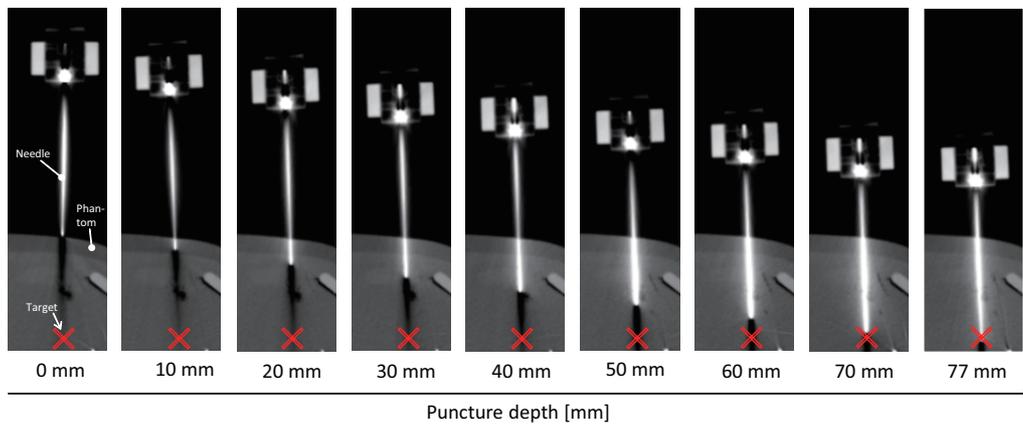


図7 たわみ除去動作中の CT 画像

手挿入の平均精度は、それぞれ 1.6mm および 1.4mm であり、その平均差の 95 % 信頼区間は -0.3 ~ 0.6mm であった。2 つの方法の間に針挿入時間、CT 透視時間、そしてファントムへの放射線被曝に有意差はなかった。ロボットによる穿刺中の医師への被ばく量は常に $0\mu\text{Sv}$ であったが、用手による挿入中の被ばく量は平均して $5.7\mu\text{Sv}$ であった ($P < .001$)。詳細は [7] を参照されたい。

4. 穿刺支援機能

現時点で CT 透視下での穿刺術は可能な状態にあると考えるが、より簡便、安全に手術を実行するために次の 2 つの機能が必要であると考えられる。ひとつは針のたわみ除去機能で、もうひとつはレジストレーション機能である以下それぞれについて述べる。

4.1 針のたわみ除去機能

IVR の用手穿刺の場合、触覚から伝わるたわみ反力や穿刺反力、針の形状から、経験に基づいて針を進める力の方向を柔軟に調整することが出来る為たわみを利用する事が可能であるが、ZeroBot では力覚はフィードバックされず、医師の経験則は適用できない。よってロボット穿刺手技において、針のたわみ発生は大きな課題の一つである [8]。また、滅菌状態を維持することを考えると針の体内に挿入される部分をロボットで把持することは避けるべきである。従って穿刺針の他端付近をロボットは把持する必要がある。また、我々はこれまでに、穿刺速度と穿刺反力の関係を調査し [9]、医師が穿刺が困難である場合に行う瞬発的な穿刺動作を空気圧アクチュエータを用いて実装している [10]。これまでのこれら実験評価によって、体表への穿刺時にたわみのない動作は困難であることがわかった。そして穿刺を進めるほど穿刺軸方向と針の刺入方向がずれていくことが確認されている。この影響により、プランニングされた針の姿勢に合わせて穿刺を開始したとしても標的部位に到達する前に経路がずれるはじめる為、医師の操作による穿刺途中の経路修正を余儀なくされている。一度針のたわみが生じると、ZeroBot の穿刺軸により針を押し進める力の方向と針の刺入方向が一致しない状況が生まれる。その状況下では、針先は針先端の向いている方向に進んでいく傾向がある為、穿刺軸を駆動させるほど針のたわみは成長していきやすい。

たわみ成長を抑制するために穿刺軸と針先の方向軸を極力一致させ、たわみが成長しづらい姿勢で針を刺入していく事が望ましい。その解決方法の一例として、針を梁とみなしてモデル化し、力センサ情報に基づいて穿刺方向を修正するアルゴリズムを提案した [11]。提案アルゴリズムによる軌道修正時の CT 画像を図 7 に示す。この実験では、穿刺深さ 10mm の時点で経路修正が行われ、そのまま針先は標的へと到達した。

現在は CT 撮影断面上での軌道修正のみであるので、CT 断面に垂直な軸方向のたわみ除去を導入する必要がある。今後の課題である。またファントム実験による精度検証であるため動物実験で有効性を検証する必要がある。

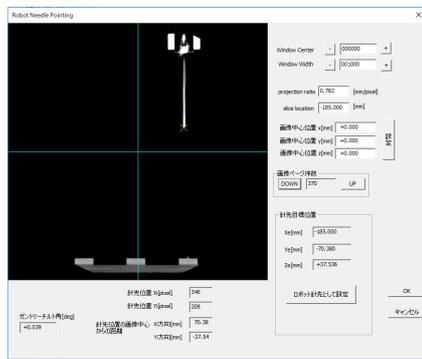
4.2 レジストレーション機能

現在は ZeroBot の手先動作は全てテレオペレーションで行っており、患者の腫瘍が存在する CT 撮影断面上に移動するのも手動である。また CT 撮影断面内での針先方向を腫瘍に向ける動作も同様に手動であるので煩雑かつミスが起こる可能性がある。そこで、ロボットが把持する針と患者の腫瘍の位置関係を DICOM 形式の CT 画像から取り出し、穿刺開始位置まで誘導するレジストレーションが有効である。図 8 は現在開発中のレジストレーション画面である。マウス操作によってロボットが把持する針先位置 (図 8(a)) と腫瘍の位置と穿刺方向 (図 8(b)) を指定する。また図 8(c) に示すような CT 画像から得られる 3 次元画像により各部位、腫瘍、針の経路などの関係が確認できる。この機能により、撮影時のロボットの手先位置から、穿刺開始位置まで誘導可能である。一方で患者にとって安全な経路を考慮する必要があり現在の課題である。

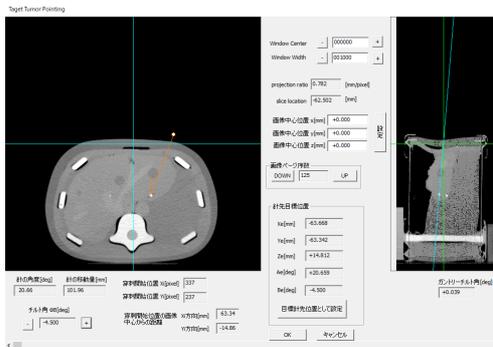
5. まとめ

我々が開発する遠隔操縦可能な CT 透視下穿刺ロボットである ZeroBot は、設置してから針を穿刺するまでのすべての過程を遠隔操縦により行う、ロボティック IVR の実現を目指している。本論文ではこれまでの成果について述べた。

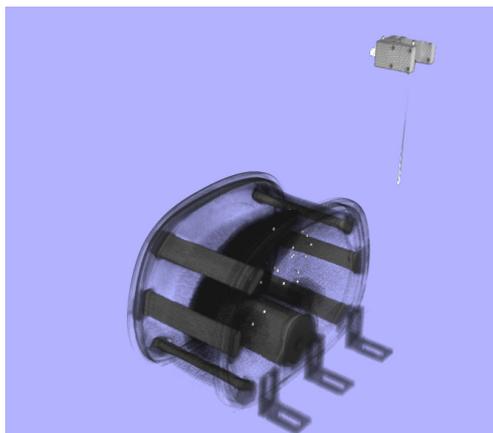
現時点で CT 透視下での穿刺術は可能な状態にあると考えるが、より簡便、安全に手術を実行するためにレジストレーション機能と針のたわみ除去機能について述べた。これらは現在、分割して開発しているが、機



(a) 針先登録画面



(b) 腫瘍指定画面



(c) CT スライス画像の3次元表示

図8 開発中のレジストレーションプログラムの外観

能統合によってより使いやすいシステムを構築できると考えている。

謝辞

本研究は一部、AMED 医療機器開発推進研究事業 15652923 と平成 29 年度特別電源所在県科学技術振興事業の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Takao Hiraki, Hideo Gobara, Hidefumi Mimura, Shinichi Toyooka, Hiroyasu Fujiwara, Kotaro Yasui, Yoshifumi Sano, Toshihiro Iguchi, Jun Sakurai, Nobuhisa Tajiri, Takashi Mukai, Yusuke Matsui and Susumu Kanazawa, "Radiofrequency Ablation of Lung Cancer at Okayama University Hospital: A Review of

10 Years of Experience", Acta Med., Vol.65, No.5, pp. 287-297, Okayama, 2011.

[2] Dan Staianovici, Kevin Cleary, Alexandru Patriciu, Dumitru Mazilu, Alexandru Stanimir, Nicolae Craciunoiu, Vance Watson and Louis Kavoussi, "AcuBot: A Robot for Radiological Interventions", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.19, NO.5, pp.927-930, OCTOBER 2003.

[3] Benjamin Maurin, Bernard Bayle, Olivier Piccin, Jacques Gangloff, Michel de Mathelin, Christophe Daignon, Philippe Zanne and Afshin Gangi, "A Patient-Mounted Robotic Platform for CT-Scan Guided Procedures", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING, VOL.55, NO.10, OCTOBER, 2008.

[4] Yilun Koethe, Sheng Xu, Gnanasekar Velusamy, Bradford J. Wood, Aradhana M. Venkatesan, "Accuracy and efficacy of percutaneous biopsy and ablation using robotic assistance under computed tomography guidance: a phantom study", European Radiology, Volume 24, Issue 3, pp 723-730, March 2013.

[5] 平木隆夫, 亀川哲志, 松野隆幸, 金沢右, "CT 透視下針穿刺用ロボット開発の歩み: 術者被ばくゼロの IVR を目指して", Jpn J Intervent Radiol, 29:375-381, 2014.

[6] Kohei Sugiyama, Takayuki Matsuno, Tetsushi Kamegawa, Takao Hiraki, Hirotaka Nakaya, Masayuki Nakamura, Akira Yanou, and Mamoru Minami, "Needle Tip Position Accuracy Evaluation Experiment for Puncture Robot in Remote Center Control", Journal of Robotics and Mechatronics Vol.28, No.6, 2016

[7] Takao Hiraki, Tetsushi Kamegawa, Takayuki Matsuno, Jun Sakurai, Yasuzo Kirita, Ryutaro Matsuura, Takuya Yamaguchi, Takanori Sasaki, Toshiharu Mitsuhashi, Toshiyuki Komaki, Yoshihisa Masaoka, Yusuke Matsui, Hiroyasu Fujiwara, Toshihiro Iguchi, Hideo Gobara, Susumu Kanazawa: "Robotically Driven CT-guided Needle Insertion: Preliminary Results in Phantom and Animal Experiments", Radiology (in press), DOI:10.1148/radiol.2017162856, 2017.

[8] Kohei Sugiyama, Takayuki Matsuno, Tetsushi Kamegawa, Takao Hiraki, Hirotaka Nakaya, Akira Yanou and Mamoru Minami, "Reaction Force Analysis of Puncture Robot for CT-guided Interventional Radiology in Animal Experiment", IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SuE5.4, Meijo University Nagoya, December 11 -13, 2015.

[9] 松野隆幸, 亀川哲志, 平木隆夫, 中家寛貴, 難波孝文, 杉山晃平, 石井創, 見浪護, 矢納陽, 五福明夫, "CT-IVR ロボットの穿刺速度に関する検証", 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015.

[10] Akira Heya, Tetsushi Kamegawa, Takayuki Matsuno, Takao Hiraki, Akio Gofuku Development of Instantaneously Puncture System for CT Fluoroscopy-Guided Interventional Radiology, IEEE/RSJ 2016 International Conference on intelligent Robots and Systems (IROS2016), Paper WeT12.9, Daejeon, Korea, October 9-14, 2016

[11] 木村和志, 松野隆幸, 杉山晃平, 平木隆夫, 亀川哲志, 見浪護" 穿刺ロボットにおける針のたわみ力を用いた軌道生成", JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017(ROBOMECH2017), 1P1-I03, 2017