

CT-IVR ロボットの穿刺速度に関する検証

○松野隆幸（岡大），亀川哲志（岡大），平木隆夫（岡大病院），
中家寛貴（岡大），難波孝文（岡大），杉山晃平（岡大），石井創（岡大），
見浪護（岡大），矢納陽（岡大），五福明夫（岡大）

1. はじめに

我々はIVR(Interventional radiology)手術をテレオペレーションで実現する手術支援ロボットを開発している．IVR手術の中で特にCT透視下での針穿刺に注目しており，その特徴について述べる．患者の体深部への針穿刺の目的は二つに大別でき，ひとつは腫瘍の化学検査における，サンプル採取のための生検針穿刺である．もうひとつは，誘電加熱による凝固を目的としたラジオ波凝固療法に代表される悪性腫瘍の壊死である．患者の体表の傷は穿刺痕だけであり，穿刺術に用いられる針は直径1.2mm程度であるので低侵襲である．また，穿刺術のガイドとしては超音波も存在し体表に近い部位への穿刺には有効である．しかし，肺の内部に存在する腫瘍を観察するには，空気層が原因で像がぼやけるため，超音波ガイドは不向きである．従ってCTガイド下での穿刺が現在有効である．ダ・ヴィンチ[1]の登場以来，内視鏡手術のロボット化が盛んに開発されている．内視鏡手術では対象臓器を直接観測するために，コテにより脂肪を溶解する必要があるがCTガイド下での穿刺術では放射線吸収率の差により臓器の像が現れるため，そのような手順は必要がない．したがって低侵襲性が高く，これからの発展が期待できる．

一方でCT透視下の穿刺術において穿刺針の操作には高い精度が必要である．これは現在医師の経験的技術によりなされているが，CT透視時に穿刺針を手で支持している医師が被ばくし大きな問題となっている．その解決方法としてCT透視下での針穿刺のロボット化を目的としている．本論文では，生検針の穿刺速度と挿入反力に関する検証実験に関して報告する．

2. CT-IVR ロボットの概要

2.1 システム構成

図1にCT-IVRロボットの外観を示す．また，ロボットの構成図を図2に示す．CT-IVRロボットはCT装置の患者用ベッドの下側に設置し，アーム部が患者の上側に来るような配置をとる．穿刺の術者である医師は放射線を遮断する防護ガラス板で仕切られた空間に座して，入力インターフェイスを用いてロボットを操作する．入力インターフェイスが接続されているPCと，ロボットはイーサネットを介して接続されている．また，針先はCT断面上にあることでCT画面上に針の像が現れるので穿刺針をCT断面上に精度よく移動するために穿刺針をモニターするカメラとディスプレイを用いる．CT装置にはCT断面を示す赤いガイド光を照射する機能があり，針先が赤く光るまで患者の頭尾方向に針を移動させる．CT-IVRロボット用入力イ



図1 Appearance of IVR Robot

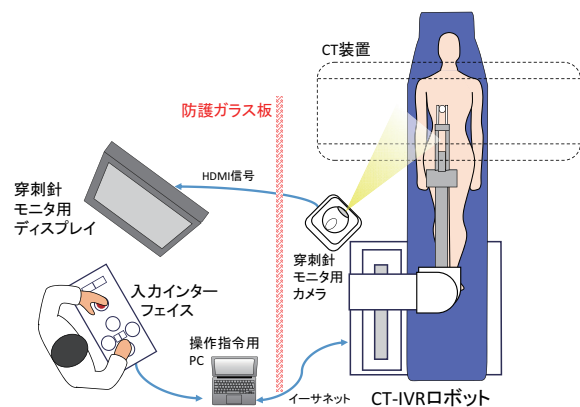


図2 System configuration

ンターフェイスを図3に示す．入力インターフェイスでは穿刺針の移動をボタン，方向変更をジョイスティックで指令する．穿刺指令ボタンは独立して配置され速い穿刺速度を指定するボタンも配置されている．

本研究のCT-IVRロボットはシリアルリンクとパラレルリンクを組み合わせた6自由度のマニピュレータである．5自由度で穿刺針の位置と姿勢を決定し，1自由度で穿刺動作を実現する．針先方向に真っ直ぐ穿刺するためにパラレルリンクを用いた機構を採用している．また，ロボットのCT断面上に位置する部品はアーチファクトと呼ばれる存在しない像の発生を抑制するため非金属で構成されていなければならない．CTガイド化での穿刺ロボットはAcubot[2]やCTBot[3]がすでに提案されているが，これらのロボットはCT撮影断面にも金属部品を用いており，肺がん治療においては問題になると考えられる．図4にエンドエフェク

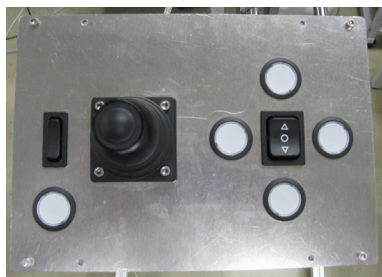


図 3 Control interface



図 4 Appearance of end-effector

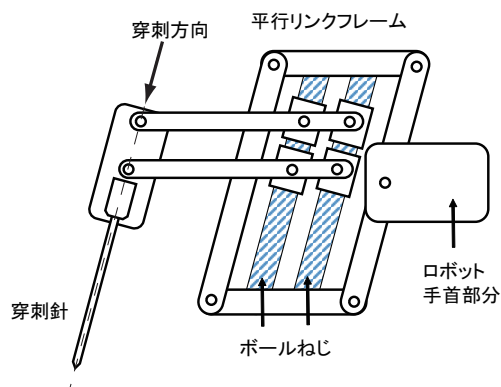


図 5 Structure of end-effector

タの外観を示し、図 5 にエンドエフェクタの構造を示す。まず、平行リンクによって頭尾方向の角度を決定し 2 つのボールねじを同期して動作させることにより、穿刺針を針先方向に向けて移動させる穿刺動作を実現する。

2.2 ロボットによる穿刺作業手順

CT-IVR ロボットを用いた穿刺手順を次に示す。

1. 患者胸部の CT 透視により、穿刺対象となる病変部位を確認する。
2. カテーテルマーカと病変部位の関係を CT 画面上で確認し、穿刺針のパスプランを決定する。患者体表に穿刺基準点をマジックペンで書き込む。
3. 頭尾方向の穿刺針の角度を調整する。
4. ガイド光と基準として穿刺針の針先を CT 撮影断面に合わせる。
5. CT 断面上の針の姿勢角度をパスプランで決定した角度に合わせる。
6. 穿刺針が金属であることにより発生するアーチファクトを利用し、CT 断面像を撮影しながら穿刺針



図 6 Appearance of experiment of IVR Robot with CT equipment



図 7 Monitor displaying both of CT image and tip of needle

の直線上に乗るように針の位置姿勢を微調整する。

7. 位置姿勢を固定し、穿刺動作を行う。穿刺により針先が体表を貫いた後パスプランにより決定した穿刺深さに到達したら、CT 透視により穿刺針先端と病変部位の関係を確認しながら穿刺する。

このような手順で、ロボットは操作される。ロボットの制御精度や操作性が悪いと CT 透視により針先位置の確認を繰り返すことになり、患者の被ばくを増やすことになるため、ロボットの手先精度は重要である。

2.3 ファントム実験

現在開発している CT-IVR ロボットの運用方法、穿刺精度を確認し、問題点を洗い出すためファントム（疑似人体模型）を用いた実験を行った。図 6 に CT 装置下でのファントム実験の様子を示す。また、ファントム実験におけるモニタ用ディスプレイの表示内容を図 7 に示す。ディスプレイ左側には CT 撮影像（3 スライス）が表示され、ディスプレイ右側には針先と体表を拡大した映像が表示される。ファントム実験中の CT 像を図 8 に示す。ファントムは我々が開発したものであり胸部の体表の脂肪、心臓、病変部位をカラギーナンを用いて製作した [4]。図 8(a) に示すように、模擬病変部位は直径 20mm の大きさと製作した。これに対して、図 8(d) に示すように、穿刺針は中心付近を通過して、病変部位の全体を穿刺できている。

3. 穿刺速度検証実験

これまでの経験により体表を貫く際に大きな力、速い穿刺速度が必要であることが分かっている。人間の皮膚組織は、表皮、真皮、皮下組織に大別できる。穿

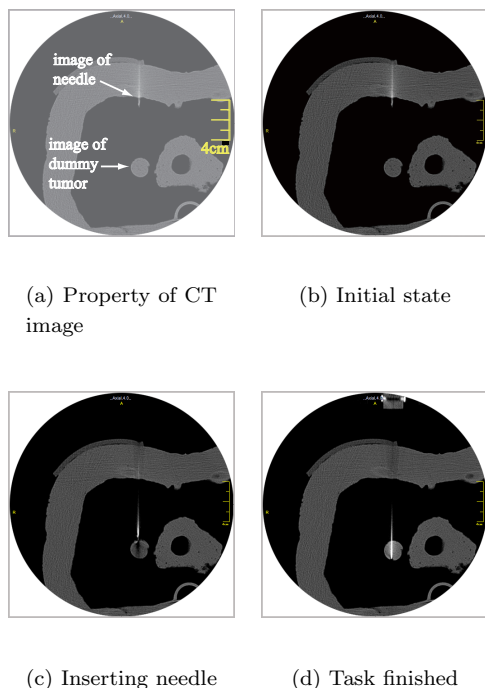


図8 CT Image during experiment

刺術においては表皮を穿刺針で貫くときに最も大きな力が必要となる．そこでは我々はCT-IVR用ファントムを用いて、生検針の穿刺速度と挿入反力の関係を検証した．

図9に穿刺速度検証実験の外観を示す．長さ約100mmの生検針を産業用マニピュレータ（三菱電機社製：RV6SL）の先端に取り付け、手先に関する等速運動により穿刺動作をおこなった．このとき、マニピュレータ手首に取り付けられた力センサ（ニッタ社製）で挿入反力を計測した．ロボットに設定した作業座標系 ΣW は図9のようになる．本実験では、図10にあるように、ファントムに皮膚シート（株式会社マルイ製）を貼り付け、その上に革シートを貼り付けた．ファントムの体表部分はカラギーナンでできており、ファントム内部はメラミンフォームを土台として、中は中空になっている．革シートは比較的硬く針で貫くのに一定の力が必要である．皮膚シートは粘性が高く、針が貫いた後も針の移動時に針の側面と粘性摩擦抵抗力が発生する．カラギーナンは脆性が高いため、穿刺動作に対する反力は発生しにくい指で押した場合の弾性は存在する．それぞれ表皮、真皮、皮下組織に対応するために三層構造を採用した．

本実験では目標穿刺速度を5, 20, 40mm/sの3通りに設定しその挿入反力を比較した．図11に実験の開始状態と終了状態を示す．穿刺針の z 軸方向の移動量は80mmであり、穿刺量は約50mmである．上位コントローラが目標手先位置を7.1msごとに指令しマニピュレータは動作する．マニピュレータは十分な加速度を発生することができるため図12にあるように穿刺開始時には目標穿刺速度に達している．

まず、穿刺速度を5[mm/s]に設定した場合の計測反力を図13に示す．計測した反力は x, y, z 軸方向であり、

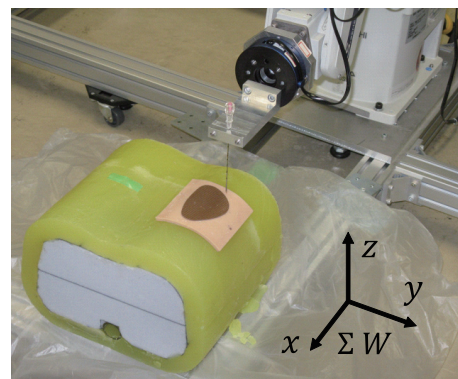


図9 Appearance of needle insertion experiment

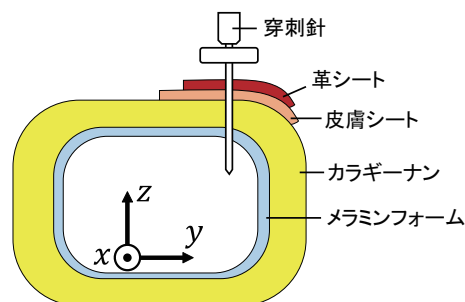


図10 Configuration of needle insertion experiment

その座標系は図9作業座標系 ΣW である．穿刺方向(z 軸方向)における反力の最大値は8.3Nに達している．また、 x, y 軸方向の反力は2N程度であった．次に、穿刺速度を20[mm/s]に設定した場合の計測反力を図14に示す．穿刺方向における反力の最大値は6.2Nに達している．同様に、穿刺速度を40[mm/s]に設定した場合の計測反力を図15に示す．穿刺方向における反力の最大値は5.3Nに達している．

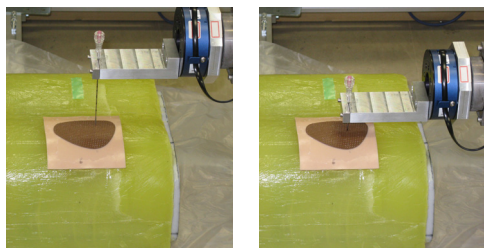
最後にこれらを比較するために挿入方向の移動量に対する挿入反力を図16に示す．挿入方向は z 軸の負の方向であるため、図16の右から左に向かって時間が進んでいる．表皮を模した革シートを貫くには穿刺速度が速いほうが穿刺反力を抑制できている．その後は穿刺速度が速いほうが、挿入反力が大きくなっている．これは粘性抵抗に起因する反力であることが予測できる．

本実験により表皮を貫くときには穿刺速度を上げることで確実に表皮を貫き、体内を穿刺針が移動する場合は穿刺速度を下げることで針側面と体内組織の粘性摩擦に関わる摩擦力を低減することできるという結論を得た．

4. おわりに

本研究では、CTガイド下で穿刺術を医師の操作によって実現するCT-IVRロボットを開発している．本論文では、生検針の穿刺速度と挿入反力の関係を検証した．穿刺速度は速いほうが、患者の表皮を鋭く貫くことができる．一方で穿刺速度が速いと粘性抵抗に関わる反力が向上することがわかった．

また、テレオペレーションで操作するロボットにおいて移動速度が速いと目標位置に対して行き過ぎるなどの問題が発生する．穿刺針移動速度を作業フェイズ



(a) Start condition (b) Finish condition

図 11 Task of needle insertion

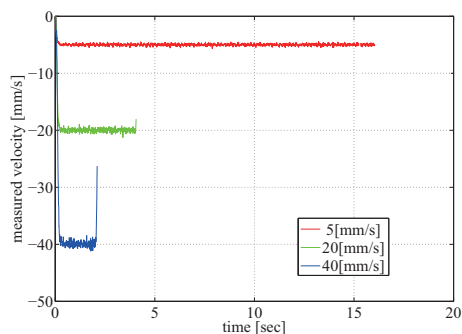


図 12 Velocity of needle insertion

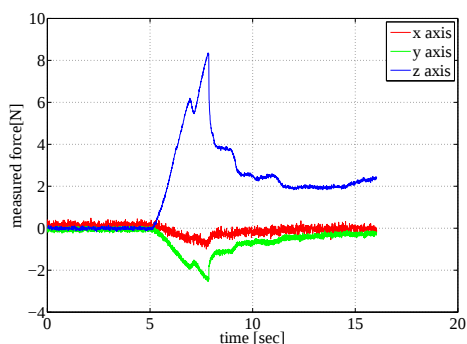


図 13 Measured force during insertion at velocity of 5 [mm/s]

に対して適切に切り替える必要があり切り替え方法などを検討する。また，速い穿刺針移動状態において移動量の制限を与えるアルゴリズムの構築も今後の課題である。

謝辞

本研究は AMED 医療機器開発推進研究事業 15652923 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] “インテュイティブサージカル社のウェブサイト”, <http://www.intuitivesurgical.com/>
- [2] Dan Stoyanovici, Louis L. Whitcomb, Russell H. Taylor, James H. Anderson, Louis R. Kavoussi, “A Modular Surgical Robotic System For Image Guided Percutaneous Procedures”, Proceedings of Medical Im-

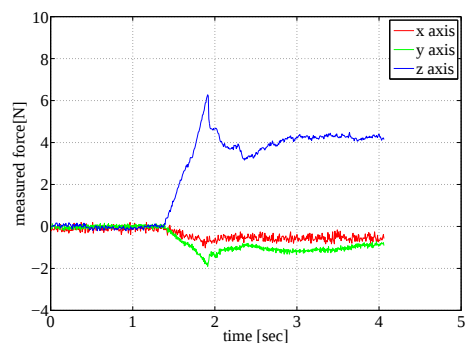


図 14 Measured force during insertion at velocity of 20 [mm/s]

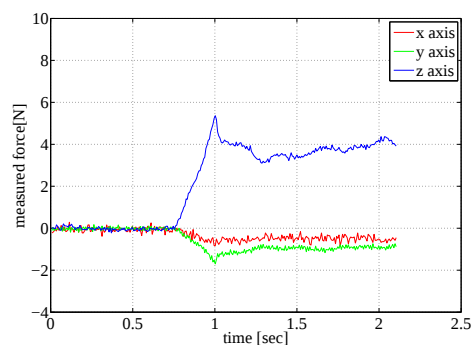


図 15 Measured force during insertion at velocity of 40 [mm/s]

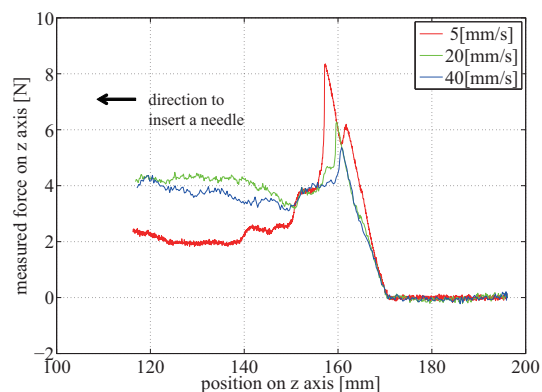


図 16 Measured force for position on insertion direction

- age Computing and Computer-Assisted Intervention , 1998.
- [3] Benjamin Maurin, Christophe Doignon, Jacques Gangloff, Bernard Bayle, Michel de Mathelin, Olivier Piccin, Afshin Gangi, “CTBot: A Stereotactic-Guided Robotic Assistant for Percutaneous Procedures of the Abdomen”, Proceedings of Medical Imaging 2005: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display, 2005.
- [4] H. Nakaya, T. Matsuno, T. Kamegawa, T. Hiraki, T. Inoue, A. Yanou, M. Minami, A. Gofuku, “CT phantom for development of robotic Interventional Radiology”, Proceedings of 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.82-87, 2014.