CT透視ガイド下針穿刺ロボットの自動化のための医師の手技中における針の軌道修正の調査

Measurement of Needle Trajectory Correction in Doctor's Procedure for Automation of CT-guided Needle Insertion Robot

亀川哲志（正会員）^{a*}, 高山和真^b, 松野隆幸^b, 平木隆夫^c, 櫻井 淳^d, 小牧稔幸^c, 松浦龍太郎^e, 佐々木崇了^f, 五福明夫^a

^a 岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科

^b 岡山大学大学院自然科学研究科

^c 岡山大学医学部放射線科

^d 岡山大学病院新医療研究開発センター

^e 岡山大学大学院保健学研究科

^f 岡山大学大学院医歯薬学総合研究科

Tetsushi Kamegawa^{a*}, Kazuma Takayama^b, Takayuki Matsuno^b, Takao Hiraki^c, Jun Sakurai^d, Toshiyuki Komaki^c, Ryutaro Matsuura^e, Takanori Sasaki^f, Akio Gofuku^a

^a Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama University

^b Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

^c Department of Radiology, Okayama University Medical School

^d Center for Innovative Clinical Medicine, Okayama University Hospital

^e Graduate School of Health Sciences, Okayama University

^f Graduate School of Medical, Dentistry and Pharmaceutical Sciences, Okayama University

Abstract

We are developing a CT-guided needle insertion robot for the purpose of reducing physician exposure dose. Automatic needle insertion will help a physician because it is a little difficult for unskilled operators to control the robot manually. In this paper, we propose a control law to realize full automatic needle insertion for a CT-guided needle insertion robot. In the control law, speed to insert a needle is given based on the result of our observation on the animal experiment. We found that the number of corrections increases as the needle approaches the target in a robotic needle insertion controlled by a physician. We propose the idea that needle insertion velocity decreases exponentially. The effectiveness of the control law is verified by a simulation experiment in which the needle start at having offset to the target trajectory. As a result, the robot in the simulation environment achieves to reach the target point by decreasing its puncture speed as the needle approaches the target.

Key words

Medical Robot, Interventional Radiology, Needle Insertion.

*岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科

〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1

kamegawa@okayama-u.ac.jp

受付2018年12月10日；採択2019年10月8日

1. はじめに

CT透視ガイド下のIVR（Interventional Radiology）は、CT画像をリアルタイムに見ながら腫瘍に対して医療用の針を穿刺して、検査や治療を行うものである。

り、低侵襲かつ短時間で手技が行えるため、実施件数が増加する傾向にある¹⁾。しかし X 線を発する CT ガントリの近くで術者が手技を行うため、術者が日常的に放射線により被ばくすることが問題となっている。

そこで、我々の研究グループでは術者の被ばく量低減を目的として、遠隔操作型の CT 透視ガイド下針穿刺ロボット (Zerobot) の研究開発を 2012 年より開始している^{2),3)}。Fig. 1 に本稿の研究で使用した Zerobot の外観と可動軸を示す。術者はコントローラを用いて Zerobot を遠隔操作し、針の位置姿勢を調整して穿刺を行う。これまでに実施した非臨床試験ならびに臨床試験により、Zerobot を用いることで術者の被ばく量をゼロに抑えて CT 透視ガイド下の針穿刺を実施できることを実証してきた^{4),5)}。

我々の取り組みのほかにも現在までにいくつかの IVR を支援する機器やロボットが開発されている⁶⁾⁻⁹⁾。これらのうち、針穿刺を能動的に実施しないものの、針の経路計画や位置決めをサポートする機器やロボットについては、すでに市販化されているものもある。一方で、術者の遠隔操作により針穿刺も含めて能動的に実施できる機器も開発されており、そのうちのいくつかは臨床試験についての報告もあるものの、現時点で市販化に至っていない。また、能動的な針穿刺も含めて実施できる機器は、将来的に CT 装置と連動して全自動で針穿刺の行程を完了するポテンシャルをもっているが、現時点で全自動の穿刺を達成した例はない。超音波ガイド下で 2 次元の自動穿刺を行う例¹⁰⁾は報告されているが、同様に CT ガイド下の針穿刺を全自動かつ高い精度で達成することができれば、患者に高品質の医療を届けることが期待できる。我々はその実現を目指して研究を行っている。

ロボットの操作は熟練していない術者にとって難しいことから、針穿刺の自動化に対する期待がある。どんなに精度よくターゲティングのフェーズにおいて生体へ刺入前に針先を標的に向けたとしても、生体内を穿刺している際には、穿刺中の針と生体との力学的な相互作用により、標的の移動や針のたわみなどが発生する¹¹⁾。また、肺の呼吸性の体動により標的が動くような場合には、穿刺の最中は患者に息止めをしてもらうなどの対処が行われ、その度に標的となる腫瘍と針の位置を確認して針の角度を修正する必要がある。煩わしいロボットの操作をすることなく、針を腫瘍の方向に向ける穿刺の自動化ができれば、術者の負担軽減、手技時間の短縮、穿刺精度均一化が期待できる。

Fig. 1 Appearance of Zerobot and definition of each axis of Zerobot. The silhouette express a patient.

これまでに我々は針の自動穿刺のための基本的な穿刺経路自動追従手法を提案している¹²⁾。この手法を用いて 3 次元の穿刺経路における穿刺経路自動追従シミュレーションを行い、針の穿刺経路へのおおよその収束性を確認している。しかし、シミュレーション内にて針に振動的な振る舞いが生じたり、針先が標的にぴったり一致して停止しないなど、針の制御アルゴリズムや穿刺経路への収束性に関して改良の余地があった。

そこで本研究では、我々の実施した動物実験の CT 画像をもとに、術者である医師がロボットを遠隔操作してブタの体内にある標的に対して穿刺を行う場合に、針と標的との位置関係によって、どのように針の軌道修正の作業を行うのかについての調査を行った。この結果を自動穿刺のアルゴリズムに取り入れることで、穿刺経路自動追従手法を改善し、制御性能の向上を図る。さらに本稿では、シミュレーションにより提案手法の検証を行った結果を示す。

2. Zerobot の概要

Zerobot は 6 自由度マニピュレータで、三次元的な針の位置姿勢の変更が可能である。Fig. 1 に示すように、X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 つの直動軸で 3 次元方向の並進運動を行い、針の位置を決定する。A 軸、B 軸の 2 つの回転軸で回転運動を行い、針の姿勢を決定する。P 軸は針の穿刺を行う直動軸である。Table 1 に速度設定の一覧を示す。各軸の速度は安全性を考慮して、穿刺前と穿刺中とでそれぞれ別の値に決められている。

Table 1 Seed setting for each axis

Axis	State of Insertion	Speed
X, Y, Z	Before/During	(30 of 5)/5 [mm/sec]
A	Before/During	(20 of 2)/2 [mm/sec]
B	Before/During	(10 of 2)/2 [mm/sec]
P	Before/During	0/(30 of 5) [mm/sec]

さらに我々の Zerobot には, Remote Center of Motion (以下 RCM) が実装されている¹³⁾. ただし, 従来研究で使われている RCM は機構的にある 1 点を回転中心として針が傾くような動きが実現されているものであるのに対し, 本稿で述べる RCM は逆運動学計算によりソフトウェア的に任意の点を回転中心として針を傾ける機能であることに注意されたい. この機能により, Zerobot では針の穿刺深さに関わらず, いつも針先の位置を中心に針を傾けるようになっている. A 軸の RCM は, 患者の左右方向に (Fig. 2 上), B 軸の RCM は, 患者の頭尾方向に針を傾ける動作となる (Fig. 2 下). Zerobot に実装されている RCM により, 針の姿勢変更時において, いつも針先を中心に針が傾くため, 体内において針先が並進移動して不用意な侵襲をすることなく, 針の軌道を修正することができる.

現時点では, Zerobot は術者が操作用コントローラを用いて操作する遠隔操作型のロボットである. 手技中は CT 装置と術者の間に防護ガラスを設置し, 術者は CT 装置から離れた場所から, カメラ画像および CT 画像から術野を確認する. 術者は防護ガラス越しに手技を行うため, CT 装置の発生する X 線により被ばくすることはない.

Zerobot を用いた手技において, まず術者は術前に穿刺経路を設定する. この際 CT 画像から標的となる病変部の位置を把握し, 標的と刺入点を結んだ直線を穿刺経路とする. このとき穿刺経路上に針が当たると危険な構造物 (心臓・太い血管・消化管など) がないように刺入点を患者の体表面に設定する.

Zerobot を用いた手技はターゲティングと穿刺の二つのフェーズからなる. ターゲティングフェーズでは, 術者が操作用コントローラを用いて Zerobot を操作し, 針先を刺入点に合わせる. その後の穿刺フェーズでは, 術者は CT 画像を見ながら針を穿刺方向に進め, 針が穿刺経路から外れていると判断した場合, RCM を用いて針の姿勢を変更して軌道修正を行う. このように, CT 透視ガイド下に行う針の穿刺はある種のビジュアルフィードバックがかかっているシステ

Fig. 2 The function of remote center of motion (RCM). The RCM enables altered needle orientation around the needle tip.

ムであり, 精度の良い穿刺を行うことができる. 本研究では Zerobot に適切なフィードバック則を実装して針を穿刺経路に追従させることで, 術者がロボットを操作する代わりに自動穿刺を行うことを目指している.

3. 穿刺経路自動追従手法

本研究で提案する穿刺経路自動追従手法は, 針に目標穿刺速度 $v_{ref}(t)$ と RCM の目標角速度 $\omega_{Aref}(t)$, $\omega_{Bref}(t)$ を与え, 穿刺経路上を針が進むようにフィードバック制御を行うものである. この手法は車輪型移動ロボットの経路追従手法を三次元空間に拡張したものである. 車輪型移動ロボットは車輪拘束によりロボットの真横の方向に動くことができない. 同様に, Zerobot においても RCM により針先の真横の方向への移動が制限されている. Fig. 3 に示すように穿刺経路と針の位置姿勢は患者の頭尾方向と左右方向で別けて考える. ここで, Δt 秒後の $v_{ref}(t + \Delta t)$, $\omega_{Aref}(t + \Delta t)$, $\omega_{Bref}(t + \Delta t)$ を式 (1) で与える.

$$\omega_{Aref}(t + \Delta t) = \omega_A(t) - \Delta t (k_1 d_A(t) + k_2 \theta_A(t) + k_3 \omega_A(t))$$

$$\omega_{Bref}(t + \Delta t) = \omega_B(t) - \Delta t (k_1 d_B(t) + k_2 \theta_B(t) + k_3 \omega_B(t))$$

$$v_{ref}(t + \Delta t) = v_d - c_A |\omega_A(t)| - c_B |\omega_B(t)| \quad (1)$$

式 (1) において k_1 , k_2 , k_3 はフィードバックゲインであり c_A , c_B は減速係数である.

式 (1) において $\omega_{Aref}(t + \Delta t)$, $\omega_{Bref}(t + \Delta t)$ は 1 ステップ前の角速度に針先と穿刺経路との位置のズレと角度のズレをフィードバックし, さらに角速度に対する減速を加えたものである. 式 (1) の $v_{ref}(t + \Delta t)$ は, 一定の値 v_d に対して RCM の角速度を考慮した減速を

Fig. 3 Positional relationship of insertion path and needle. Here, the angle between the needle and insertion path θ_A or θ_B [deg], the distance between the needle tip and insertion path is d_A or d_B [mm], the remaining insertion depth is d_R [mm].

加えているが、ここでは穿刺深さや標的までの距離に関係のない式となっている。

一方で、後述する動物実験において医師が Zerobot をマニュアルで操作する際の針の軌道修正では、針が標的に近づくにつれ軌道を修正する頻度が指数的に増えることが観察されている。これは、1) ある程度深く穿刺しないと針のズレを把握できない。2) 標的に近づくにつれて、穿刺は慎重に行われる。3) 針先が標的から遠い体表面の付近では高速モードで穿刺を行う。4) 針先が標的に近い場合には低速モードの穿刺を行う、といったことが理由として考えられる。実際に後述の動物実験において、針先が標的に近づくにつれ標的の位置がずれる現象がしばしば観察されており、残りの穿刺深さに応じて CT で針と標的の位置関係を確認する頻度を増やし、慎重に穿刺をすることが必要となる。

そこで本研究では、針の軌道修正点の間隔が狭まる様子を、針が標的に近づくにつれ穿刺速度を落としていくとみなし、ロボットの自動穿刺においても標的近くで慎重かつ正確な穿刺を実現するために、残りの穿刺深さ d_R の減少につれ目標穿刺速度 $v_{ref}(t)$ を指数関数的に減速させる項を式 (1) の $v_{ref}(t)$ を与える式に追加し、次の式 (2) で与える。

$$v_{ref}(t + \Delta t) = v_d (1 - e^{-bd_R}) - c_A |\omega_A(t)| - c_B |\omega_B(t)| \quad (2)$$

式 (2) において、定数 b は穿刺速度の減速定数である。

Fig. 4 Position relationship between needle and target

4. 軌道修正傾向の調査

4.1 調査概要

本研究では、動物実験で使用した Zerobot の記録を解析することで、穿刺中に軌道修正を行った際の残りの穿刺深さ d_R と軌道修正の頻度から、式 (2) 中の減速定数 b を求める。動物実験の穿刺中の針の軌道修正は、CT 画像に写った針と標的の位置関係から、医師の判断によって行われる。この修正には、A 軸の角度修正、B 軸の角度修正、刺し直しの 3 通りがある。いずれの修正においても、解析では一連の CT 画像のなかから医師が針の軌道修正を行う直前の CT 画像を抽出し、その時の針と標的の位置関係を調べた。

抽出した CT 画像の一例を **Fig. 4** に示す。調査項目は、軌道修正を行う直前の標的深さ [mm]、穿刺深さ [mm]、残りの穿刺深さ [mm]、修正角度 [deg] の 4 つである。これらを DICOM ビューワに表示された CT 画像上にて計測した。

4.2 調査対象の穿刺試験

調査に使用したデータは、ブタを用いた穿刺精度試験で得られたものである。これは、ブタの体内にあらかじめ挿入した直径 1 [mm] のタングステン球にどれくらい精度良く穿刺を行うことができるかを確認する試験である⁴⁾。穿刺部位は、臀筋、腎臓、肺、肝臓の 4 ケ所で、針の種類は、LeVeen、Cool-tip、凍結針の 3 種類である。4 つの部位を 3 種類の針で 5 回ずつ穿刺した合計 60 回の穿刺精度試験で得られたデータを調査した。なお術者は Zerobot の操作に熟練した放射線

Table 2 Insertion Accuracy in vivo animal experiment

Ablation Needles	LeVein	Cool-tip	IceRod
Insertion Accuracy Mean $\pm$ SD [mm] (95% CI)	3.1 $\pm$ 1.2 (2.5, 3.6)	2.8 $\pm$ 1.2 (2.2, 3.4)	2.5 $\pm$ 0.8 (2.1, 2.9)

Fig. 5 Histogram of remaining insertion depth. There is a target at the point where the puncture depth is 0.

科の医師である。Table 2 に穿刺精度試験の結果を示す。この結果は、アブレーション治療に必要な穿刺精度として我々の設定した 5 [mm] に対して十分な精度であり、本研究で参照するデータとして適切であると考えている。

4.3 調査結果と考察

軌道修正傾向の調査の結果を Fig. 5 に示す。ロボットを医師が遠隔操作することによる穿刺において、針が標的に近づくにつれ修正回数は指数的に増加していることがわかる。なお、残りの穿刺深さが約 10 [mm] となるのをピークに、それ以降は A 軸と B 軸の修正回数は減少し、一方で刺し直し回数が増加している様子が観察された。これは、針先が標的に十分近づいてしまうと、RCM の効果で針先を真横に動かすことができず、一度針を抜く方向に動かして指し直す必要があるためである。合計 60 回の穿刺のうち、A 軸の修正は 110 回、B 軸の修正は 66 回、刺し直しは 37 回であった。A 軸の修正が B 軸よりも多いのは、A 軸のズレは CT 断面の平面内において容易に確認できるためである。

Fig. 5 のヒストグラムを指数関数で近似することにより、残りの穿刺深さに対する修正頻度の近似曲線は $y = 11.9e^{-0.0245x}$ となった。この結果より、式 (2) の減速定数 b を $b = -0.0245$ と設定することとする。

Fig. 6 Model of Zerobot used for simulation. This model has the same degree of freedom as the real machine.

5. 自動穿刺シミュレーション

本章では 3 章で提案した穿刺経路自動追従手法により、針が三次元的に穿刺経路に追従できることを確認した結果を示す。

5.1 シミュレーション概要

シミュレータは Ubuntu 14.04 上で ROS indigo と Gazebo 2.2 を用いて構築した。シミュレーション上で作成した Gazebo による Zerobot のモデルを Fig. 6 に示す。これは実機と同じ自由度構成であり、手先部には長さ 150 [mm] の針を取り付けている。

シミュレーションにおける穿刺経路は鉛直下向きとする。また、初期条件として針の穿刺開始位置は、穿刺経路と針先との距離のズレとして $d_A = 5.0$ [mm], $d_B = -5.0$ [mm] とする。また、穿刺経路と針のなす角ズレとして $\theta_A = 5.0$ [deg], $\theta_B = -5.0$ [deg] とする。ただし、本シミュレーションにおいては、患者の体動などに起因する標的の動きや、生体組織からの反力、針のたわみは考慮しないものとする。シミュレーションにおいて、針の角速度のフィードバックゲインをいくつか変化させた場合の挙動の違いについて確認を行った。次節の結果では、シミュレーションの結果の 1 例として、うまく標的に針先が収束した場合の結果を示す。

5.2 結果と考察

シミュレーションの結果として、針が穿刺経路へ収束している様子を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より穿刺経路と針との距離 d_A , d_B と角度 θ_A , θ_B がゼロに収束しており、針先を三次元的な穿刺経路に追従させることがで

Fig. 7 Convergence of needle to insertion path in a simulation of automatic needle insertion.

きることを確認した。また、この際の針の穿刺速度と回転速度の変化の様子を Fig. 8 に示す。Fig. 8 により、針が標的に近づくにしたがって穿刺速度が減速していることが確認できた。

また、Fig. 8 により、自動穿刺の穿刺速度の変化は以下の4つの過程に分けられることが確認された。

①：穿刺の初期姿勢では針が穿刺経路から大きくずれているため、針の位置と姿勢を修正するための大きな角速度が発生し、穿刺速度が負になって針を抜去する方向に動く。②：針が穿刺経路に十分に近づくとき、穿刺速度が大きくなる。③：A 軸と B 軸の角速度がどちらも 0 [deg/sec] のとき、穿刺速度は最大になるが、残りの穿刺深さのフィードバックの効果により $v_d (1 - e^{-bd_R})$ 以上の速度にはならない。④：残りの穿刺深さが 0 [mm] かつ、A 軸と B 軸の角速度がどちらも 0 [deg/sec] となったとき、穿刺速度は 0 [mm/sec] となり、穿刺が完了する。

本シミュレーションにおいては、穿刺中の針と生体との間の相互作用による外乱が考慮されていないため、制御パラメータが適切であれば誤差をゼロに収束させることができた。本稿で提案する穿刺経路自動追従手法のフィードバックの効果により、体動や標的のズレに起因する小さな経路の更新があったとしても、ある程度は対応して針先が標的的位置に到達することが期待されるが、どの程度のズレまで許容できるかは、今後さらに検証する必要がある。

6. 結言

本稿では、CT 透視ガイド下針穿刺ロボットを動物実験で使用した際の、医師の軌道修正の頻度に関する

Fig. 8 Deceleration of insertion velocity in a simulation of automatic needle insertion. $v_d (1 - e^{-bd_R})$ is a boundary of insertion velocity.

調査を行った。その結果から新たな穿刺経路自動追従手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を検証するためのシミュレーションを行い、その結果、針が穿刺経路に沿って三次元的に追従し、標的に近づくにしたがって減速することを確認した。

今後は、針穿刺中に針と標的の位置関係によって標的がどのように動くか CT 画像から調査し、これをモデル化してシミュレーションに組み入れたあと、提案手法で自動穿刺がどの程度達成されるかを検証する予定である。また、目標穿刺経路と針との位置と角度のずれを測定するために CT と連動したロボットシステムを開発することで、実機を用いた検証実験をすることが今後必要である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17K10439, 19K08174 の助成を受けた。

文献

- 1) 八木孝仁. 肝がんの外科的治療と再発治療の変遷. 岡山医学会雑誌 2008;120:63-67.
- 2) 北村浩基, 亀川哲志, 五福明夫, ほか. ロボティック Interventional Radiology の設計と試作. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文 筑波:2013;2A1-K05.
- 3) 平木隆夫, 亀川哲志, 松野隆幸, ほか. 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. IVR 学会誌 2014;29:375-381.
- 4) Hiraki T, Matsuno T, Kamegawa T, et al. Robotic Insertion of

Various Ablation Needles Under Computed Tomography Guidance: Accuracy in Animal Experiments. *Eur J Radiol* 2018;105:162-167.

- 5) 亀川哲志, 松野隆幸, 平木隆夫. CT ガイド下 IVR 用針穿刺ロボット (Zerobot[®]) を用いた臨床試験 (First-in-human 試験) の実施. *J JSCAS* 2018;20(4):237.
- 6) Arnolli MM, Hanumara NC, Franken M, et al. An overview of systems for CT- and MRI-guided percutaneous needle placement in the thorax and abdomen. *Int J Med Robot* 2015;11:458-475.
- 7) Fichtinger G, DeWeese TL, Patriciu A, et al. System for robotically assisted prostate biopsy and therapy with intraoperative CT guidance. *Acad Radiol* 2002;9(1):60-74.
- 8) Stoianovici D, Cleary K, Patriciu A, et al. AcuBot: A Robot for Radiological Interventions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 2003;19(5):927-930.
- 9) Abdullah BJ, Yeong CH, Goh KL, et al. Robotic-assisted thermal ablation of liver tumours. *Eur Radiol* 2014;24:246-257.
- 10) 洪 在成, 土肥健純, 橋爪 誠, ほか. 画像誘導による臓器運動補償型穿刺マニピュレータに関する研究. *J JSCAS* 2004;4:443-448.
- 11) Sugiyama K, Matsuno T, Kamegawa T, et al. Reaction Force Analysis of Puncture Robot for CT-guided Interventional Radiology in Animal Experiment. *Proceedings of the 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration* 2015;7-12.
- 12) 高山和真, 亀川哲志, 松野隆幸, ほか. CT ガイド下針穿刺ロボットの自動化に関する研究. 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEAD29) 講演論文集 2017;7-0-06:317-320.
- 13) Sugiyama K, Matsuno T, Kamegawa T, et al. Needle Tip Position Accuracy Evaluation Experiment for Puncture Robot in Remote Center Control. *Journal of Robotics and Mechatronics* 2016;6:911-920.