# CT ガイド下針穿刺ロボットの術前レジストレーション機能の実現 3次元画像による穿刺経路の確認

Regstration function for needle puncturing robot under CT guidance Confirmation of needle path with three demensional image

正 松野隆幸 (岡山大)	正	亀川哲志 (岡山大)
平木隆夫(岡山大)		木村和志(岡山大)
城戸脩希 (岡山大)	ΤĒ	見浪護 (岡山大)

Takayuki MATSUNO, Okayama University, matsuno@cc.okayama-u.ac.jp Tetsushi KAMEGAWA, Okayama University Takao HIRAKI, Okayama University Kazushi KIMURA, Okayama University Naoki KIDO, Okayama University Mamoru MINAMI, Okayama University

In recent years, interventional radiology (IR) which is a medical procedure has been attracting attention. Doctors can perform IR percutaneously while observing the fluoroscopic image, such as CT and MRI images, of patients. Therefore, this surgical method is less invasive. However, doctors are exposed to strong radiation in the case under CT-guidance. In order to overcome this problem, we developed remote-controlled IR assistance robot. A registration function, which calculates offsets of coordinate systems, and a three dimensional display function, which helps us to confirm the path of needle and posture of a robot, are introduced.

Key Words: Interventional Radiology, Puncture Robot, Registration Function

## 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

本論文では開発中の穿刺ロボット Zerobot を紹介し,レジス トレーション機能とターゲティング機能について述べる.

## 2 運動学

Zerobot は Fig.1(a) の座標系を有し, Fig.1(b) のように伸ば したアームを CT ガントリー内で動作させることで手先の針を操 作する構造となっている.

穿刺経路計画によっては CT を Fig.2 のように傾ける事があ



り, CT 断面は必ずしも地面と垂直な関係にはない.以上の事から, Zerobot のターゲティング時におけるリモートセンタ機能は, Fig.3 のように定義される CT 断面上での針の角度  $\phi_A$ , CT の仰角  $\phi_B$  を独立に制御するよう実装されている.

ここで目標針先位置,針の姿勢 $r^*$ を満たす各関節の角度および変位の目標値 $q^* = [q_1^*, ..., q_6^*]$ を計算するため,逆運動学を 導出する. $\Sigma_W$ から見た目標とする針先位置および針の姿勢が  $r^* = [x^*, y^*, z^*, \phi_A^*, \phi_B^*]^T$ で与えられたとする. $r^* \ge q^*$ の間 には式(1)から式(5)までの関係が成り立つ.

$$\phi_B^* = \tan^{-1} \left( \frac{1}{C_{q_4^*}} \tan q_5^* \right)$$
 (1)

$$\phi_A^* = \tan^{-1} \left( C_{\phi_B^*} \tan q_4^* \right)$$
 (2)



Fig.2 Tilting function of CT guntry



**Fig.3** Definition of  $\phi_A$  and  $\phi_B$ 

$$x^{*} = (l_{9} + l_{E} + q_{6}) S_{q_{4}^{*}} C_{q_{5}^{*}} S_{\alpha_{3}} + l_{2} S_{q_{4}^{*}} S_{\alpha_{3}} + l_{3} - q_{3}^{*} + l_{7} S_{q_{4}^{*}} S_{q_{5}^{*}} S_{\alpha_{3}}$$
(3)

$$y^{*} = (l_{9} + l_{E} + q_{6}) S_{q_{5}^{*}} S_{\alpha_{3}} - l_{1} S_{\alpha_{3}} + q_{2}^{*} - l_{7} S_{\alpha_{3}} C_{q_{5}^{*}}(4)$$

$$z^* = q_1^* - l_2 C_{q_4^*} - (l_9 + l_E + q_6) C_{q_4^*} C_{q_5^*} - l_7 S_{q_5^*} C_{q_4^*}(5)$$

ここで  $l_1$  などのパラメータは Fig.4 に示す長さである.ここで, 穿刺軸 ( $q_6$ ) は逆運動学計算時の位置を保持する事を前提とし,  $q_6$  は既知の値として扱う.よって逆運動学は次のようになる.

$$q_4^* = \tan^{-1} \left( \frac{1}{C_{\phi_B^*}} \tan \phi_A^* \right) \tag{6}$$

$$q_{5}^{*} = \tan^{-1} \left( C_{q_{4}^{*}} \tan \phi_{B}^{*} \right)$$
(7)

$$q_1^* = z^* + l_2 C_{q_4^*} + (l_9 + l_E + q_6) C_{q_4^*} C_{q_5^*}$$

$$+ l_7 S_{q_5^*} C_{q_4^*}$$
(8)
(9)

$$q_2^* = l_1 S_{\alpha_3} - (l_9 + l_E + q_6) S_{q_5^*} S_{\alpha_3} + y^*$$

$$+ l_7 S_{\alpha_3} C_{q_5^*} \tag{10}$$

$$q_3^* = l_2 S_{q_4^*} S_{\alpha_3} + (l_9 + l_E + q_6) S_{q_4^*} C_{q_5^*} S_{\alpha_3} + l_3 - x^* + l_7 S_{q_4^*} S_{q_5^*} S_{\alpha_3}$$
(11)

#### 3 レジストレーション機能

レジストレーション機能について述べる.本研究におけるレジストレーションは CT 画像情報からロボットの座標系と CT の座標系とのオフセット距離を計測し正しい位置関係を得る手法である.本研究に用いる画像データは DICOM 形式を用いる. DICOM データは画像以外にも様々な情報が書き込まれており, この情報を用いる.ここで CT Image の座標系を Fig.5 に示す.  $\Sigma_{CT}$ 座標系は一般の画像と同じように左上を原点とする座標系で,  $\Sigma_{I}$ 座標系は画像の中心に原点を移動した座標系である.また,ガントリー中心座標系を Fig.6 に示す.ガントリー中心座標系  $\Sigma_{GC}$ は CT スキャン平面の中心に原点を持ち,ロボット座標系  $\Sigma_{W}$ と同じ向きを持つ座標系である. $\Sigma_{GC}$ は  $\Sigma_{I}$ と原点を共有し,ガントリーが傾いても姿勢は維持される.

次に,オフセット取得方法について述べる.まず,CTボリュームスキャンによりロボットが把持している針先を含んだ CT 画



(a) Side view

(b) Front view



(c) Endeffector

Fig.4 Definition of robot kinematics parameters



Fig.5 Coordinate system on CT image

像を取得する.次に Fig.7 にあるように CT 画像を表示しクリックにより針先を指定する.このときの針先位置を前述の運動学によって得られた針先位置と比較して  $\Sigma_W$  座標系から見た  $\Sigma_{GC}$  座標系の原点  ${}^WP_{GC-ORG}$ を得る.

# 4 ターゲティング機能

次にターゲティング機能について述べる.本研究におけるター ゲティングは CT 画像上で穿刺目標の腫瘍の中心と穿刺開始点を 指定することで穿刺開始位置までロボットを誘導する手法である. Fig.8 にターゲティングのプログラム画面を示す.傾けた CT イ メージ上での腫瘍をクリックし,ドラッグによって穿刺開始位置 を指示する.Fig.8 ではファントム(CT 撮影用疑似人体)にタン グステン球を埋め込み目標としている.ここで画面上でクリック した目標位置を<sup>1</sup>xne,<sup>1</sup>yne とし,穿刺開始位置を<sup>1</sup>xns,<sup>1</sup>yns と する.このとき穿刺開始時のロボット把持するの目標針先位置

No. 18-2 Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kitakyushu, Japan, June 2-5, 2018



Fig.6 Coordinate system of Guntry



Fig.7 Appearance of program to point needle edge

 $(x_s, y_s, z_s)$  は次式より得られる.

$${}^{GC}_{GC}x_s = -\delta_S N - \eta \,^I y_{se} \sin({}^W \phi_B) \tag{12}$$

$${}^{GC}y_s = \eta {}^I x_{ns} \tag{13}$$

$${}^{GC}z_s = -\eta {}^{I}y_{ns}\cos({}^{W}\phi_B) \tag{14}$$

ここで  $\delta_S$  はボリュームスキャンのスライス間隔,  $\eta$  は CT 画像 のピクセルと距離の比率, そして N はボリュームスキャンにお ける画像配列の序数である.これらは全て DICOM 画像群から 取得することが可能である.また, ${}^W\phi_B$ はFig.8 で指定したス キャン画面の傾きである.またスキャン平面上での針姿勢 $^{W}\phi_{A}$ は次式より得られる.

$${}^{W}\phi_{A} = \tan^{-1}\left(\frac{{}^{I}x_{ne} - {}^{I}x_{ns}}{-({}^{I}y_{ne} - {}^{I}y_{ns})}\right)$$
 (15)

上記の  $\Sigma_{GC}$  座標系で得られた目標位置を  $\Sigma_W$  座標系に変換し, 針姿勢と合わせて逆運動学を解くことで穿刺開始時のロボット関 節角度 q が得られる.

次に Fig.9 に 3 次元表示による穿刺経路確認画面を示す.3 次 元表示には Open GL を用いた . Fig.9 ではロボットの手先 ( 穿 刺開始位置状態,穿刺後状態)と人体の断面画像,および CT ガ ントリー内壁を図示する.また,CTスキャンのFOV(Field of View)を赤線で示す.FOVは拡大縮小も併せて自由に設定でき るが, FOV 情報は DICOM データには記載されていないため, Fig. 5 に示す  $\Sigma_I$  座標原点からガントリーの中心までの距離を DICOM データから得ることはできない.そこで本論文で用いた 手法では,撮影時に FOV の中心をガントリーの中心に合わせた 状態で撮影した.本実験で用いた CT ガントリーの直径は 720mm であり,ロボットの手先との干渉の可能性があるため,この画面 により術前に干渉がないことを確認する.また,ロボットが針を 把持している手先と患者との干渉が発生しないことも確認できる.





Cephalocaudal image

CT Image on inclined plane

Fig.8 Appearance of program to point tumor and preparation position on inlclinated scanning plane



Fig.9 Appearance of program with Open GL

### まとめ

5

開発中の穿刺ロボット Zerobot を紹介し, レジストレーション 機能とターゲティング機能について述べた . Open GL を用いた 3次元表示によって術前にロボット手先とガントリー内壁の干渉 が確認できるため有効である.

#### 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 Doignon, Philippe Zanne and Afshin Gangi, "A Patient-Mounted Robotic Platform for CT-Scan Guided Procedures", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGI-NEERING, 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.

No. 18-2 Proceedings of the 2018 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Kitakyushu, Japan, June 2-5, 2018