

穿刺ロボットアームのCTガントリ内壁との衝突防止システムの提案

○城戸 脩希 (岡山大), 松野 隆幸 (岡山大), 木村 和志 (岡山大), 亀川 哲志 (岡山大),
平木 隆夫 (岡山大), 見浪 護 (岡山大)

Proporsal of a collision warning system of the puncture robot with the inner wall of CT gantry

○ Naoki KIDO (Okayama University), Takayuki MATSUNO (Okayama University),
Kazushi KIMURA(Okayama University), Tetsushi KAMEGAWA(Okayama University),
Takao HIRAKI(Okayama University), and Mamoru MINAMI(Okayama University)

Abstract : The puncture robot is developed in order to avoid the radioactive exposure to doctor using CT equipment. It is possible for the puncture robot to hit CT gantry during the operation. So, we conduct experiments by preparing personnel visually observe the distance near the gantry. Therefore, we propose a collision warning system instead of the personnel.

1. 緒言

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)という手術法がある[1]. 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[2]. 従来の外科手術と比較すると低侵襲であるため, 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. 術者は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. 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[3], CTbot[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. このZerobotは術者がガントリから少し離れたところからリモートコントロールしているので, 術者の放射線被ばくを0にすることができる. 本論文では, 穿刺ロボットを用いた手技中に, ロボットがガントリと衝突した場合, ロボットがガントリを傷つけてしまう可能性があるため, 目視で監視をする人員を用意しており, 術者は衝突が起こらないことを監視員に確認しながらロボットを操作するので, 手技を行う時間が長くなってしまいう問題に対して, ロボット, ガントリ間の距離の計測を自動化することを提案する.

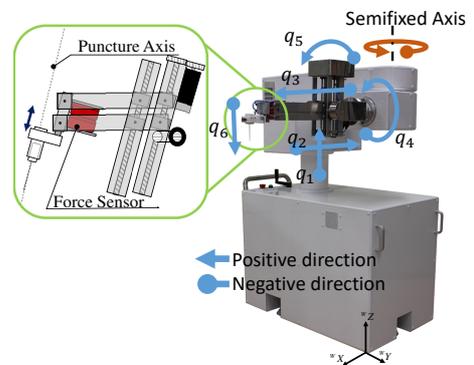


Fig. 1: Appearance of Zerobot

2. Zerobot

開発したZerobotの外観と手先部の拡大図をFig.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. コントローラを用いて, 遠隔操作が可能である. CT装置の仕組み上, ガントリ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有する樹脂を使用している. また, ロボットアーム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.

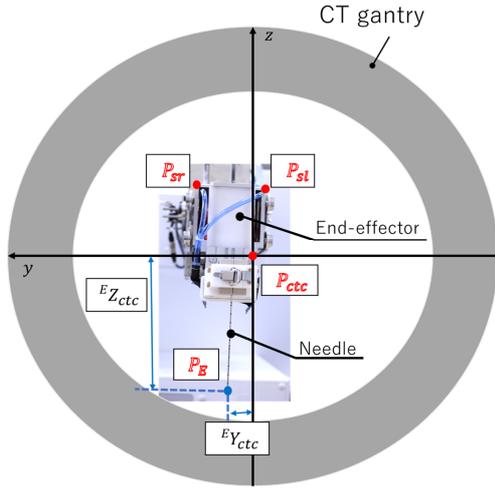


Fig. 5: Location of gantry center P_{ctc}

$$\begin{aligned}
 {}^w T_E &= {}^W T_0 {}^1 T_1 {}^2 T_2 {}^3 T_3 {}^4 T_4 {}^5 T_5 {}^6 T_6 T_E \\
 &= \begin{bmatrix} -C_{q_5} & 0 & S_{q_5} & {}^w x_E \\ -S_{q_4} S_{q_5} & C_{q_4} & S_{q_4} C_{q_5} & {}^w y_E \\ C_{q_4} S_{q_5} & S_{q_4} & -C_{q_4} C_{q_5} & {}^w z_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 {}^w x_E &= -(q_6 + l_9 + l_E) S_{q_5} S_{\alpha_3} - q_2 + l_1 + l_7 C_{q_5} - l_4 \\
 {}^w y_E &= l_3 - q_3 + l_2 S_{q_4} + (q_6 + l_9 + l_E) S_{q_4} C_{q_5} \\
 &\quad + l_7 S_{q_4} S_{q_5} - l_5 \\
 {}^w z_E &= q_1 - l_2 C_{q_4} - (q_6 + l_9 + l_E) C_{q_4} C_{q_5} - l_7 S_{q_5} C_{q_4} + l_6
 \end{aligned}$$

である。

3.2 ガントリ中心 Σ_{ctc} から衝突危惧点 P_{sr}, P_{sl} までの距離の導出

次に、衝突が危惧される点の位置を定義する。衝突が危惧される点を P_{sr}, P_{sl} を Fig.3 ように設定する。Table 2 に l_x, l_y, l_z のパラメータを示す。また、ガントリの中心を Fig.5 のように P_{ctc} を設定する。

Table. 2: The length of l_x, l_y and l_z

l_x [mm]	l_y [mm]	l_z [mm]
25	46	50

得られた同次変換行列 ${}^{ctc} T_{sr}, {}^{ctc} T_{sl}$ を用いて、ガントリ中心 P_{ctc} から衝突が危惧される点 P_{sr}, P_{sl} までの距離を得る。そのためにまず、ワールド座標系 Σ_w からガントリ

中心 Σ_{ctc} まで計算し、得られた同次変換行列を式 (3) に示す。 Σ_w と Σ_{ctc} の座標系の向きは一致しているため、ロボットの姿勢を表す ${}^w R_{ctc}$ は単位行列で表される。針先を撮影した CT 画像より、針先 P_E からガントリ中心 P_{ctc} の距離を得ることができ、同次変換行列 ${}^{ctc} T_E$ を得る。 ${}^w T_E$ を CT 画像撮影時のロボットの関節角度 q から得る。

$${}^w T_{ctc} = {}^w T_E {}^E T_{ctc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & {}^w x_{ctc} \\ 0 & 1 & 0 & {}^w y_{ctc} \\ 0 & 0 & 1 & {}^w z_{ctc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 {}^w x_{ctc} &= -S_{q_5} Z_{ctc} + l_1 - l_4 - S_{q_5} (q_6 + l_9 + l_E) - q_2 \\
 &\quad + C_{q_5} l_7 \\
 {}^w y_{ctc} &= C_{q_4} Y_{ctc} + S_{q_4} C_{q_5} Z_{ctc} + S_{q_4} l_2 + l_3 - l_5 \\
 &\quad - q_3 + S_{q_4} C_{q_5} (q_6 + l_9 + l_E) + S_{q_4} S_{q_5} l_7 \\
 {}^w z_{ctc} &= S_{q_4} Y_{ctc} - C_{q_4} C_{q_5} Z_{ctc} - C_{q_4} l_2 + l_6 + q_1 \\
 &\quad - C_{q_4} C_{q_5} (q_6 + l_9 + l_E) - C_{q_4} S_{q_5} l_7
 \end{aligned}$$

である。

次に、ロボットに設定されている Σ_6 から衝突危惧点 P_{sr}, P_{sl} の同次変換行列を式 (4),(5) に示す。得られた同次変換行列 ${}^6 T_{sr}, {}^6 T_{sl}$ を用いて、式 (6),(7) のようにロボットのワールド座標系 P_w から P_{sr}, P_{sl} までの距離を得る。

$${}^6 T_{sr} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -l_x \\ 0 & 1 & 0 & -l_y \\ 0 & 0 & -1 & -l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^6 T_{sl} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -l_x \\ 0 & 1 & 0 & l_y \\ 0 & 0 & -1 & -l_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^w T_{sr} = {}^w T_6 {}^6 T_{sr} \quad (6)$$

$${}^w T_{sl} = {}^w T_6 {}^6 T_{sl} \quad (7)$$

最後に、ガントリ中心 P_{ctc} から衝突危惧点 P_{sr} までの同次変換行列を式 (8) ように計算する。この時の ${}^{ctc} P_{sr}$ は式 (9) のように表される。

$${}^{ctc} T_{sr} = {}^{ctc} T_w {}^w T_{sr} \quad (8)$$

$${}^{ctc} P_{sr} = \begin{bmatrix} {}^{ctc} x_{sr} \\ {}^{ctc} y_{sr} \\ {}^{ctc} z_{sr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし,

$$\begin{aligned} {}^{ctc}x_{sr} &= -{}^wz_{ctc} + C_{q_5}l_x + S_{q_5}l_z - l_4 + l_1 - S_{q_5}q_6 - q_2 \\ {}^{ctc}y_{sr} &= -{}^wy_{ctc} + S_{q_4}S_{q_5}l_x + C_{q_4}l_y - S_{q_4}C_{q_5}l_z - l_5 + l_3 \\ &\quad - q_3 + S_{q_4}l_2 + S_{q_4}C_{q_5}q_6 \\ {}^{ctc}z_{sr} &= -{}^wz_{ctc} - C_{q_4}S_{q_5}l_x - S_{q_4}l_y + C_{q_4}C_{q_5}l_z + l_6 + q_1 \\ &\quad - C_{q_4}l_2 - C_{q_4}C_{q_5}q_6 \end{aligned}$$

である.

同様に, 同次変換行列 ${}^{ctc}P_{sl}$ を式 (10) に示す.

$${}^{ctc}P_{sl} = \begin{bmatrix} {}^{ctc}x_{sl} \\ {}^{ctc}y_{sl} \\ {}^{ctc}z_{sl} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} {}^{ctc}x_{sl} &= -{}^wx_{ctc} + C_{q_5}l_x + S_{q_5}l_z - l_4 + l_1 - S_{q_5}q_6 - q_2 \\ {}^{ctc}y_{sl} &= -{}^wy_{ctc} + S_{q_4}S_{q_5}l_x - C_{q_4}l_y - S_{q_4}C_{q_5}l_z - l_5 + l_3 \\ &\quad - q_3 + S_{q_4}l_2 + S_{q_4}C_{q_5}q_6 \\ {}^{ctc}z_{sl} &= -{}^wz_{ctc} - C_{q_4}S_{q_5}l_x + S_{q_4}l_y + C_{q_4}C_{q_5}l_z + l_6 + q_1 \\ &\quad - C_{q_4}l_2 - C_{q_4}C_{q_5}q_6 \end{aligned}$$

以上の同次変換行列の計算から得られた ${}^{ctc}y_{sr}, {}^{ctc}z_{sr}$ と ${}^{ctc}y_{sl}, {}^{ctc}z_{sl}$ を用いて, 式 (11)(12) を用いて, 計算することでガントリ中心 Σ_{ctc} から衝突危険点 Σ_{sr}, Σ_{sl} までの距離を得ることができる. ガントリと衝突危険点は同一平面上に存在するので, ${}^{ctc}x_{sr}, {}^{ctc}x_{sl}$ については言及しない.

$$r_{sr} = \sqrt{({}^{ctc}y_{sr})^2 + ({}^{ctc}z_{sr})^2} \quad (11)$$

$$r_{sl} = \sqrt{({}^{ctc}y_{sl})^2 + ({}^{ctc}z_{sl})^2} \quad (12)$$

4. 実験

衝突防止システムの実装するにあたって, 本システムの精度の検証を行った. 検証のために, 衝突防止システムで用いた計算値を測域センサを用いて取得した実測値と比較した.

4.1 実験方法

本実験に用いる測域センサ (Fig.6) の測定範囲は 270[degree] である. この範囲を 0.25[degree] 間隔で計測し, 1080 個の距離データを取得している. ロボットの土台部は手押し台車であり, 設置位置が毎回異なるため, ロボットとガントリの相対的な位置は毎回異なる. そのため, ロボットにガントリ内壁の位置を取得させるために CT 画像を用い

る. CT 画像から針と CT ガントリの相対距離を取得し, Fig.7 のように針先がガントリの中心になるように操作した. その後, 針などの部品を取り外し, 検証のために用意した測域センサを Fig.8 のように取り付けた. また, 測域センサは計測するものが近すぎると精度が低下するので, 少し離れた場所に取り付ける必要がある. 衝突危険点をガントリ内壁に近づけ, 停止させた後に, 測域センサで距離を測った. 計測は 100 回行った.

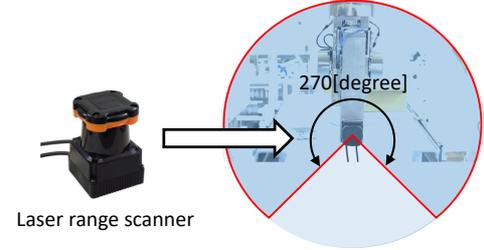


Fig. 6: Measurement range of the laser range scanner

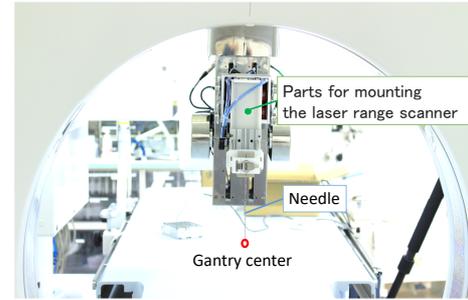


Fig. 7: Posture of Zerobot when the needle point is aligned with the gantry center

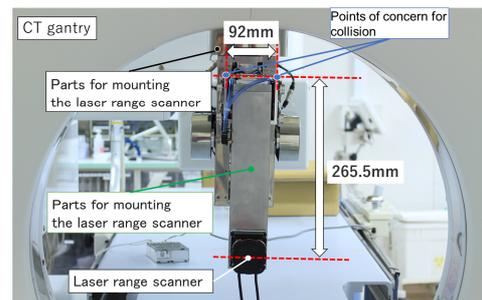


Fig. 8: Zerobot when mounting the laser range scanner

4.2 実験結果の取得方法

センサから得られた結果を整理すると, Fig.9 のようなグラフが得られるが, 不要なベッドの距離データが含まれ

ているので、ベットの距離データは除外する。また、得られたデータはガントリ内壁を測定したものであるが、ガントリ内壁より内側に一定の誤差が発生する。原因はガントリの内壁が X 線を透視する特殊な材質であるからであると考えられる。そこで、下記の実験データ取得フローのように実験結果を得る。

4.3 測定距離の計算フロー

測定距離の計算は下記のステップで実行する。

- (1). ガントリの情報を抽出し、ガントリの円弧を作成
測域センサを用いて、得られた実験結果は Fig.9 のように得られる。ベッドまでの距離情報が含まれているので除外し、Fig.10 ようにガントリ内壁だけの計測したデータを抽出し、距離データから弧を作成する。
- (2). 弧の中心点の取得
Fig.10 のように、円弧上の計測点の中で、90[degree] 間隔の 3 点を選び、垂線を 2 本引くことで弧の中心点を求める。同様に弧の中心点を 60 個求め、平均することでガントリ中心を得る。
- (3). 実際のガントリ内壁の位置の取得
Fig.11,12 のように、推定したガントリ中心を基にガントリ内壁を得る。ガントリの形状は半径 360[mm] である。
- (4). ガントリ内壁と衝突危惧点との距離を算出
得られたガントリ内壁の位置とロボットの寸法から、ガントリ内壁と衝突危惧点との距離を式 (13),(14) より計算する。

$$L_{sr} = 360 - r_{sr} \quad (13)$$

$$L_{sl} = 360 - r_{sl} \quad (14)$$

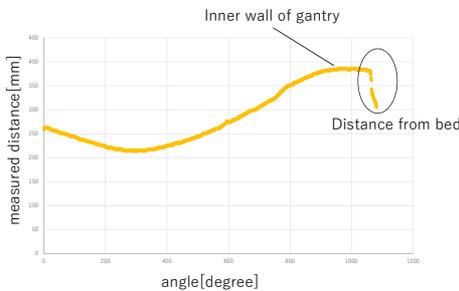


Fig. 9: Graph obtained from the laser range scanner

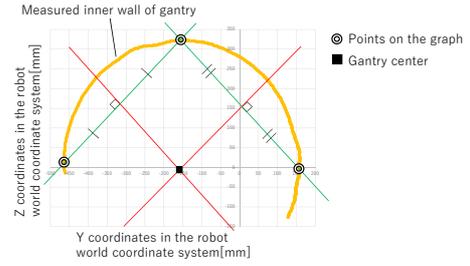


Fig. 10: How to obtain the gantry center coordinates

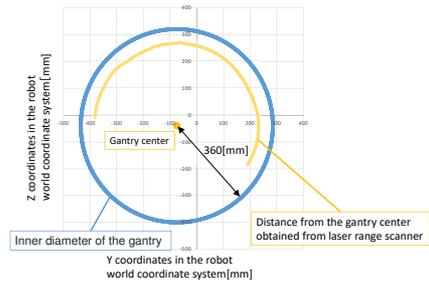


Fig. 11: Position of point of concern for collision and the gantry inner diameter when the robot arm moved -156 [mm] in the Y-axis direction from the gantry center

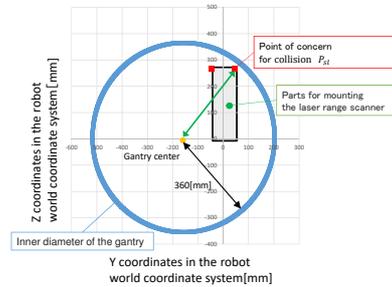


Fig. 12: Distance obtained in the experimental results

Table. 3: Conditions in measurement

Id	Y-axis[mm]	Z-axis[mm]	A-axis[degree]
1	-156	0	0
2	156	0	0
3	-78	45	0
4	78	45	0
5	-61	55	-15
6	61	55	15

5. 実験結果と考察

5.1 実験結果

衝突危険点をガントリー内壁に近づけ、計測を行った時の条件を Table 3 に、結果を Table 4 に示す。例として、Fig.13 に実験条件 1 の計測時のロボットの姿勢を示す。求めた距離 (実測値) と運動学から求めたガントリー内壁と衝突危険点との距離 (理論値) を比較し、検証する。実測値と理論値を比較することで、提案手法の有効性について検証を行った。

5.2 考察

Table4 に示すように、実測値と理論値の差が最小でほぼ 0[mm] で一致している点があったが、最大で 21.4[mm] 離れているところがあった。A 軸を傾けずに操作したときと、A 軸を傾けて操作したときを比べると後者のときに精度が落ちていたので、運動学の計算で用いたロボットの垂直方向の寸法や、座標系の計算を見直す必要があると思われる。

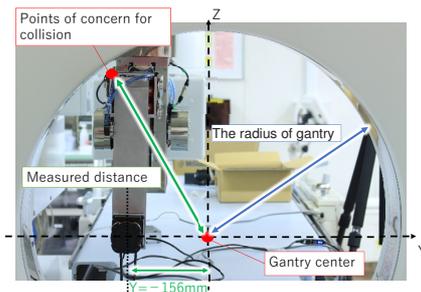


Fig. 13: appearance of distance accuracy measurement

6. 結言

本報告では、穿刺ロボットアームの CT ガントリー内壁との衝突防止システムの提案について報告した。今後は、考察でも述べたように、運動学の計算を見直し、精度を向上させ、実際の手技に用いることができるように、研究を進める。

参考文献

- [1] 日本 IVR 学会, “<http://www.jsivr.jp/>”
- [2] 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.+

Table. 4: Experimental result; Measured distance is distance from the gantry center obtained from laser range scanner to point of concern for collision. Estimated distance is Distance from the gantry center obtained from kinematics to point of concern for collision. Id used in Table 4 is the same as the Id used in Table 3.

Id	nth	(a) Measured distance[mm]	(b) Estimated distance[mm]	error $ (a) - (b) $
1	1	339.9	340.8	0.9
	2	337.5	340.8	3.3
	3	338.3	340.8	2.5
2	1	333.6	340.8	7.2
	2	336.4	340.8	4.4
	3	340.9	340.8	0.1
3	1	328.2	340.9	12.7
	2	330.2	340.9	10.7
	3	330.5	340.9	10.4
4	1	327.2	340.9	13.7
	2	327.1	340.9	13.8
	3	328.4	340.9	12.5
5	1	322.0	339.8	17.8
	2	318.4	339.8	21.4
	3	322.7	339.8	17.1
6	1	323.5	335.0	11.5
	2	323.7	335.0	11.5
	3	324.1	335.0	10.9

- [3] 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.
- [4] 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 ENGINEERING, VOL.55, NO.10, OCTOBER, 2008.
- [5] 杉山 晃平: ”穿刺ロボットにおける針のたわみ力最小化動作を用いた穿刺精度の改良”, 岡山大学大学院自然科学研究科機械システム工学専攻 平成 28 年度修士論文
- [6] John J.Craig 著, 三浦宏文・下山勲 訳: ロボティクス-機構・力学・制御-, pp.58-73

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17K10439 の助成を受けたものです。