

IVR ロボットの逆運動学を用いた操作性の改良

Improvement of Operability of IVR Robot by Inverse Kinematics

○ 杉山晃平 (岡山大) 井上卓也 (岡山大)
 正 松野隆幸 (岡山大) 正 亀川哲志 (岡山大)
 平木隆夫 (岡山大学病院) 正 矢納陽 (岡山大)
 正 見浪護 (岡山大) 正 五福明夫 (岡山大)

Kohei SUGIYAMA, Okayama University, en422839@s.okayama-u.ac.jp
 Takuya INOUE, Okayama University
 Takayuki MATSUNO, Okayama University
 Tetsushi KAMEGAWA, Okayama University
 Takao HIRAKI, Okayama University Hospital
 Akira YANO, Okayama University
 Mamoru MINAMI, Okayama University
 Akio GOFUKU, Okayama University

There is a surgical method called Interventional Radiology (IVR). We have been developing surgery support robot of IVR. IVR has the advantage that invasiveness is low, therefore the number of IVR surgery has been increasing in recent years. In lung cancer treatments, however, it has the problem that doctors are exposed to radiation because IVR is conducted in CT equipment. The purpose of this study is to avoid the problem by operating remote steerable IVR robot. IVR robot with 5 DOF have been developed in the prior study. Previously, each joint was controlled independently. Therefore, when the posture of needle is changed, the position also should be corrected manually. To improve operability of IVR robot, the forward kinematics and the inverse kinematics is solved. Finally, accuracy of needle tip position is evaluated.

Key Words: Interventional Radiology, Surgery support robot, Puncture robot

1 緒言

近年、図1に示す Interventional Radiology(IVR) という手術方法が広がっている [1]. IVR は放射線診断技術 (X線透視, 超音波像, CT装置, 血管造影法など) を利用した手術方法であり, 肺がん治療や肝臓がん治療, 生検術など, さまざまな治療に応用されている. この手術法は, 体内の透視画像をもとに細い針やカテーテルなどを挿入し経皮的に治療を行うといった特徴があり, 従来の外科的手術と比較すると低侵襲で患者への負担が軽い. そのため, IVRによる手術件数は年々増加傾向にある. しかし, 肺がん治療におけるIVRではCT装置下で手術を行うため, CT装置から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発生している.

そこで我々はIVRにおける医師の放射線被曝量ゼロを目指し, 図2に示す医師がロボットを遠隔操縦してIVR手技を行うロボティックIVRの研究開発を行ってきた [2]. ロボティックIVRではCT室外からの手技が行えるため, 医師の放射線被曝量低減が期待できる. また, ロボットの位置決め精度によって手術時間の短縮も期待できる. 先行研究において, 手術用の針を把持でき, 針先位置と針の姿勢の制御に1つの円弧軌道を含む4自由度, 穿刺方向に1自由度をもつIVRロボット [3], [4] を試作し, CT-IVR用ファントム [5] による穿刺実験を行った. これまで, このIVRロボットは単軸ごとに制御しているため, 針の姿勢の変更を行うと針先位置が動いてしまう. そのため, 目標とする針先位置, 針の姿勢に合わせるのが手間である. そこで, 針先位置を中心とした針の姿勢変更を実現するため, IVRロボットの順運動学, 逆運動学を解き, 制御システムに組み込むことによってIVRロボットの操作性の改良を行った.

本報では, IVRロボットのエンドエフェクタを逆運動学を用いて駆動し, レーザーセンサを用いた針先位置精度の検証について報告する.



Fig.1 IVR surgery

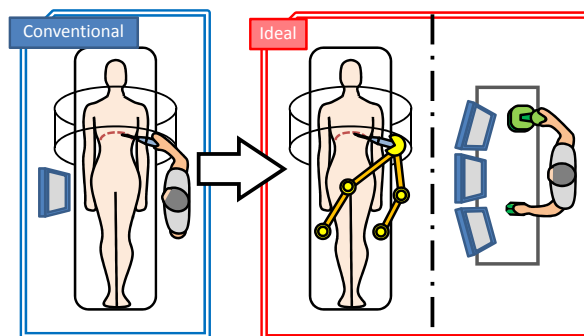


Fig.2 Concept of Robotic IVR

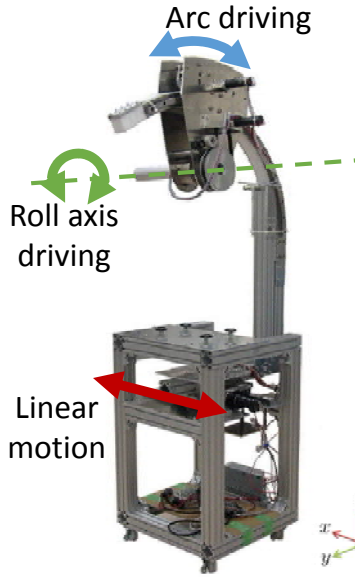


Fig.3 Prototype of base mechanism



Fig.4 Produced end effector

2 ロボットの機構

ロボットはベースユニットとエンドエフェクタから構成され、本節ではその機構について述べる。

2.1 ベースユニット

まず IVR ロボットのベースユニットについて説明する。このユニットは、図 3 中に矢印で示している直動、アーク駆動、ロール軸回転の 3 軸駆動機構を有している。ロール軸上にエンドエフェクタが取り付けられ、手先はアーク駆動によって円弧の軌跡を描く。これにより、円筒状の CT ガントリーと干渉せず、患者を軌道の中心にして作業を行える。

2.2 エンドエフェクタ

次にエンドエフェクタについて説明する。ベースユニットによって x 軸方向移動、アーク駆動、ロール軸回転の 3 自由度が確保されている。しかし、針を任意の姿勢で穿刺させるには、さらにエンドエフェクタによりピッチ軸回転機構、針の穿刺機構を組み込む必要がある。また、穿刺作業は針の先端の向きに沿って直動させなければならない。一対の平行直動機構を駆動させることによって針がピッチ軸回転し、残りの 1 軸を駆動させることで穿刺作業を行うことができるような機構を採用する。試作したエンドエフェクタを図 4 に示す。

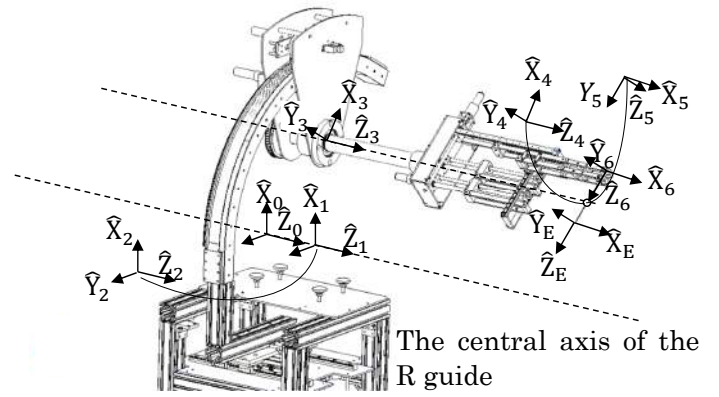


Fig.5 Layout frames

3 運動学解析

本節では順運動学と逆運動学について述べる。

3.1 順運動学

図 5 のように各リンクにフレームを配置し、表 1 に示す DH パラメータ [6] を用いると順運動学は次のように表せる。

Table 1 DH parameter

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	q_1	0
2	R'	0	0	q_2
3	l_8	0	0	q_3
4	0	90°	t	0
5	0	-90°	0	Ω
6	0	0	q_E	0

$${}^0\mathbf{T}_E = \begin{bmatrix} c\theta_5 c(\theta_2 + \theta_3) & -s(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_5 c(\theta_2 + \theta_3) & r_{Ex} \\ c\theta_5 s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & -s\theta_5 s(\theta_2 + \theta_3) & r_{Ey} \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & r_{Ez} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$r_{Ex} = a_2 c\theta_2 - a_3 c(\theta_2 + \theta_3) - d_E s\theta_5 c(\theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

$$r_{Ey} = a_2 s\theta_2 - a_3 s(\theta_2 + \theta_3) - d_E s\theta_5 s(\theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

$$r_{Ez} = d_1 + d_4 + d_E c\theta_5 \quad (4)$$

$$d_E = d_6 + l_E \quad (5)$$

である。ここで、 $c\theta_i$ は $\cos \theta_i$ 、 $s\theta_i$ は $\sin \theta_i$ の略記である。また、導出に必要なパラメータは次の表 2、式 (6)~式 (8) に示す。 $q_1 \sim q_6$ は各軸の角度 [deg] または変位 [mm] である。

$$\Omega = 90^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{q_6 - q_5}{l_3} \right) \quad (6)$$

$$q_L = \frac{q_5 + q_6}{2} \quad (7)$$

$$q_E = \frac{q_4}{\sin \Omega} \quad (8)$$

Table 2 Parameter of IVR robot

parameter	value
l_3	0.072[m]
l_8	0.011[m]
l_{10}	0.1715[m]
l_{11}	0.2885[m]
l_{12}	0.421[m]
R	0.525[m]
R'	0.2495[m]
l_E	0.1984[m]

3.2 逆運動学

次に逆運動学解析について述べる。まず目標手先位置姿勢として目標フレーム E^* を設定し、基準座標から E^* への同次変換行列 ${}^0\mathbf{T}_{E^*}$ を ZXY オイラー角と x, y, z を用いて表す。

式 (1) と ${}^0\mathbf{T}_{E^*}$ を比較して整理すると、0 フレームから針先位置までの同次変換行列が ${}^0\mathbf{T}_{E^*}$ となるための DH パラメータが得られる。最も手先部から遠いベースユニットは施術中固定することから q_1 を既知とし、DH パラメータを元に逆運動学を解くと次に示す式で表される。

$$q_2 = \text{Atan2}(s\theta_2, c\theta_2) \quad (9)$$

$$q_3 = \alpha - q_2 \quad (10)$$

$$q_4 = \sin \gamma (l_E - d_E) \quad (11)$$

$$q_5 = z - q_1 - d_E \cos \gamma - (l_{12} + l_{10} + l_{11}) + \frac{l_3}{2} \tan(90^\circ - \theta_5) \quad (12)$$

$$q_6 = z - q_1 - d_E \cos \gamma - (l_{12} + l_{10} + l_{11}) - \frac{l_3}{2} \tan(90^\circ - \theta_5) \quad (13)$$

ただし、

$$c\theta_2 = \frac{x - (a_3 + d_E s\gamma)c\alpha}{a_2} \quad (14)$$

$$s\theta_2 = \frac{y - (a_3 + d_E s\gamma)s\alpha}{a_2} \quad (15)$$

$$d_E = \frac{a_3 - xc\alpha - ys\alpha + \sqrt{(xc\alpha + ys\alpha)^2 - x^2 - y^2 + a_2^2}}{s\gamma} \quad (16)$$

である。

4 制御システム

エンドエフェクタの制御方法は図 6 のように表される。ただし、 $\mathbf{x}^* = [x^*, y^*, z^*, \alpha^*, \beta^*, \gamma^*]^T$ は目標針先位置、 $\mathbf{q}^* = [q_4^*, q_5^*, q_6^*]^T$ は目標関節角度、 $\mathbf{q} = [q_4, q_5, q_6]^T$ は関節角度、 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_4, \tau_5, \tau_6]^T$ はモータの発生トルクである。制御用 PC から目標値をマイコンに送信し、エンコーダの値から得られた現在位置との偏差によって PI 制御を行う。制御則は次の式のように表される。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{k}_p (\mathbf{q}^* - \mathbf{q}) + \mathbf{k}_i \int (\mathbf{q}^* - \mathbf{q}) dt \quad (17)$$

ただし、 \mathbf{k}_p は比例ゲイン行列、 \mathbf{k}_i は積分ゲイン行列である。

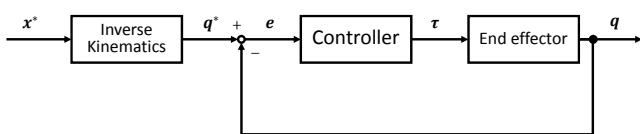
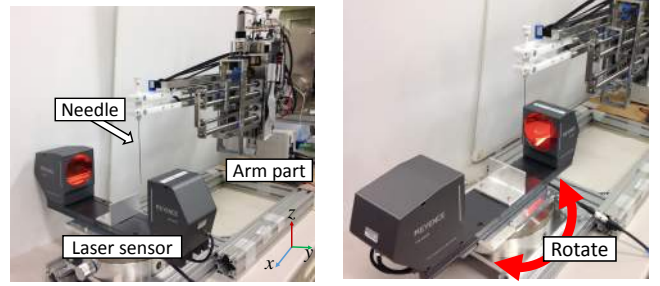


Fig.6 Controll system of end effector



(a) Laser sensor and arm of IVR robot

(b) Rotation of laser sensor

Fig.7 Experimental environment

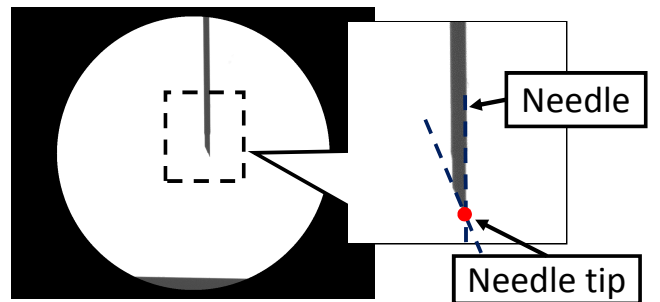


Fig.8 Needle image captured by LED image sensor

5 検証実験

本節では式 (9)~式 (13) に示す逆運動学を用いて、エンドエフェクタのみでの針先位置精度検証実験について述べる。

5.1 実験機器

実験には次の機器を使用した。

- IVR ロボット (エンドエフェクタ)
- レーザーセンサ (KEYENCE 社 TM-065)

5.2 実験環境

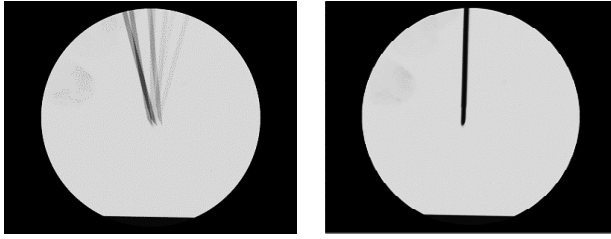
実験環境を図 7 に示す。図 7(a) のようにロボットとセンサを配置すると、xz 平面でのセンサ画像から針先位置が測定され、図 7(b) のようにセンサを回転させると yz 平面での針先位置を同様に測定することができる。

5.3 測定方法

レーザーセンサを使用すると図 8 のような二次元の画像を得ることができる。測定方法は図 8 に示すように、針先端の画像のエッジから二本の近似直線を作成し、近似直線の交点を針先位置として測定する。

5.4 実験方法

まず針をセンサ基準位置に移動させ、初期姿勢として $\alpha = 0.0[\text{deg}]$, $\beta = 0.0[\text{deg}]$, $\gamma = -75[\text{deg}]$ を与える。この姿勢から逆運動学を用い、 $\gamma = -105[\text{deg}]$ まで $5[\text{deg}]$ ずつ変化させ、それぞれの状態でのセンサデータを取得した。得られたセンサデータから針先位置を測定し、初期姿勢の時の針先位置との差を測ることで、針先位置精度の検証を行った。また、エンドエフェクタの各軸の目標位置への追従は PC 内部時刻で 5 秒間のみ行い、全試行における条件を揃えて実験を行った。



(a) xz plane experiment (b) yz plane experiment

Fig.9 Superimposed needle image

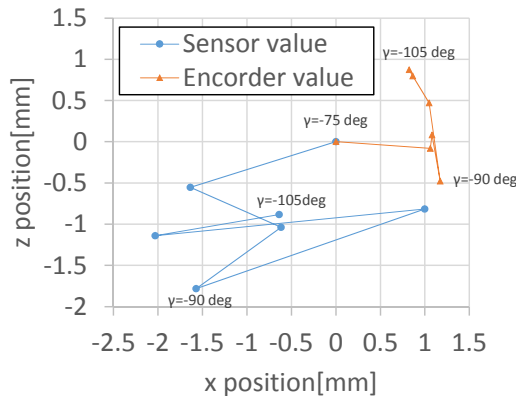


Fig.10 Detected needle tip position on xz plane

5.5 結果

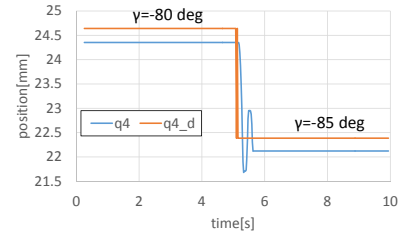
図 9(a) は xz 平面, 図 9(b) は yz 平面で得られたセンサ画像をそれぞれすべて重ね合わせたものである. xz 平面においてセンサで取得した針先位置, およびエンコーダの値から得られた針先位置とそれぞれの初期位置からの差を表したグラフを図 10 に示す.

5.6 考察

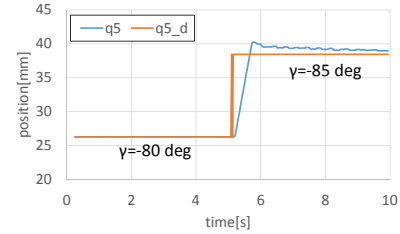
図 9(b) より, y 方向への動きはほぼ無いため, xz 平面上のデータのみから考察を行う. 図 10 を見ると, センサから得られた針先位置は x 方向に最大 2[mm], z 方向に最大 1.7[mm] ずれていることが分かる. 先行研究において設定されている穿刺針の針先位置精度は 1[mm] 以内であるため, 改善する必要がある. センサから得られた針先位置とエンコーダから得られた針先位置を比較すると, 互いに異なった動きをしていることがわかる. この原因としては, 順運動学の計算上考慮されていない機構のガタやたわみが原因となっていると考えられる. また, 理想的にはエンコーダから得られたグラフは点 [0, 0] のみにデータがあるはずであるが, x 方向に最大 1.1[mm], z 方向に最大 0.8[mm] ずれがある. 図 11 に示す各軸の変位の推移を見てみると, 目標値との偏差が残っていることがわかる. これが原因で目標手先位置に完全に追従できず定常偏差が残るといえる. これはボールねじの静止摩擦の影響が考えられる. 以上のことから, 針先位置精度の向上のためには機構のガタやたわみ, 各軸のボールねじの静止摩擦力への対策が必要であると考える.

6 結言

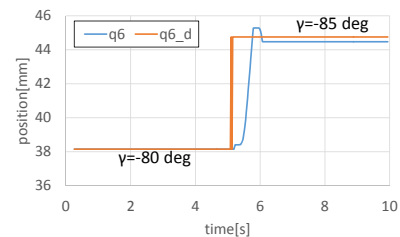
今回は, 導出した逆運動学とエンドエフェクタ, レーザーセンサを用いて針先位置精度を検証したことについて報告した. 今後は, 機構のガタやたわみ, アクチュエータ部の静止摩擦による定



(a) q_4 value



(b) q_5 value



(c) q_6 value

Fig.11 Encoder values

常偏差を軽減させ, 針先位置精度を向上させていく. また, 針先位置固定時でも現状ではステップ目標を与えているため過渡状態で針先が意図せず移動する. これを解決するため, 制御に分解速度法などを取り入れ, 操作性の向上も合わせて行っていく.

References

- [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”, IVR 会誌 Jpn J Intervent Radiol 29:375-381, 2014
- [3] 北村浩基, 亀川哲志, 川原博, 松野隆幸, 平木隆夫, 五福明夫, 見浪護:” ロボティック Interventional Radiology 試作 3 号機の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3P1-C03, 富山, 2014
- [4] 井上卓也, 中家寛貴, 松野隆幸, 亀川哲志, 平木隆夫. 矢納陽, 見浪護:” 肺がん治療における低侵襲 Interventional Radiology 支援ロボットの開発 -試作機のエンドエフェクタ改造と性能評価-”, 第 15 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), pp. 1773-1778, 東京, 2014
- [5] 中家寛貴, 松野隆幸, 亀川哲志, 平木隆夫, 井上卓也, 見浪護, 矢納陽, 五福明夫:” CT-IVR 用ファントムの製作と評価”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 3A1-C04, 富山, 2014
- [6] John J.Craig, “ロボティクスー機構・力学・制御ー”, pp.58-73, 共立出版,