

パラレルリンク機構を用いた低侵襲ロボティック IVR の提案 -基礎機構の製作と手先位置精度検証実験-

Proposal of a Minimally Invasive Robotic IVR Using a Parallel Link Mechanism -Manufacture of a Basic Mechanism and Verification Experiment-

○ 井上 卓也 (岡山大) 正 松野 隆幸 (岡山大)
正 矢納 陽 (岡山大) 正 見浪 護 (岡山大)

Takuya INOUE, Okayama University, inoue-807@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Takayuki MATSUNO, Okayama University
Akira YANOU, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University

There is a surgical method called Interventional Radiology(IVR) using CT equipment in the medical treatment of lung cancer, a blood vessel, and so on. IVR has the advantage that invasiveness is low and the medical treatment in local anesthesia is possible as compared with a laparotomy surgery. Therefore the number of IVR surgery has been increasing in recent years. But, radiation exposure to doctors has been concerned in the current IVR since doctors conduct the treatment using CT equipment. Thus, the IVR robot is developed in order to avoid the radioactive exposure to doctors. In this research, a robot using a parallel link mechanism is developed from the viewpoints that hand accuracy and hand rigidity are high and a motor can be arranged in the position separated from CT scanning plane. The dual delta-type parallel link is proposed. It has the structure arranged the Delta-type parallel link mechanism with three degrees of freedom(DOF). First, the arm which has offset of the axis in consideration of interference was designed. Secondly, inverse kinematics analysis of a parallel link was conducted. Next, Delta-type parallel link mechanism with three DOF was manufactured. Finally, basic motion of parallel link robot was confirmed.

Key Words: Surgical assistant robot, less-invasive operation, Interventional Radiology

1. 緒 言

年々、医療技術は進歩している。そのひとつに X 線装置やカテーテル等の器材の発達により飛躍的な進歩を遂げている Interventional Radiology(IVR) と呼ばれる手術法がある [1]。IVR とは、X 線透視や超音波像、CT などの画像診断技術を利用して体内にカテーテルや針を挿入し治療を行う手術法のこと、様々な治療に応用されている。IVR には大きく分けると血管系 IVR と非血管系 IVR の 2 つに分類される。血管系 IVR の手法としては、腫瘍に血液を供給する血管内から抗癌剤を注入する動注療法や、腫瘍血管や出血の原因となっている血管を塞栓する血管塞栓術などが挙げられる。非血管系 IVR の手法としては、肝臓がんや肺がんなどの治療において針を刺してラジオ波(高周波)を発生させることによって腫瘍を焼灼するラジオ波凝固療法、体内にたまった膿などにチューブを入れて体外に排泄させるドレナージ術などが挙げられる。IVR には、外科的手術と比較すると侵襲性が低く、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 手術の数が増加している。

今回、肺がんに対する IVR 手術(ラジオ波凝固療法)に着目した。肺がん治療では肺に空気層があるため X 線画像や超音波像では腫瘍が映らない。そのため、肺がん治療においては、CT 装置を利用した IVR 手術がほとんどである。現状の肺がんに対する IVR 手術では、図 1 に示すように CT 装置下において医師が針やカテーテルを把持して治療を行っているため医師への放射線被曝が危惧されている。

そこで、ロボットを遠隔操作しラジオ波凝固療法を行うことで医師への放射線被曝の低減を考える。現在、画像誘導による手術支援ロボットは多く研究されている [2], [3] が、ラジオ波凝固療法に対する支援ロボットはまだ開発されていない。また、放射線被曝の低減だけでなく、CT 画像情報による位置制御により、針の穿刺回数の低減が期待できる。今回のロボティック IVR の構想を図 2 に示す。本研究では、肺がんに対するラジオ波凝固療法を支援するロボットを提案する。



Fig. 1 Interventional radiology

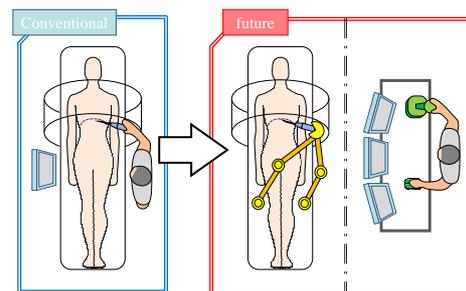


Fig. 2 Concept of robotic IVR

2. ロボティック IVR

2.1 ロボットの仕様

手術環境から IVR ロボットの仕様について述べる。はじめにロボットのサイズについて考える。IVR 手術は CT のガントリー内で行われているため、ロボットは CT 装置のガントリー内で作業を行えるサイズである必要がある。次にロボティック IVR を実現するために考慮すべき現象として CT 画像上に発生

するアーチファクト (実際に存在しない像) が挙げられる。アーチファクトには、金属が原因で発生するメタルアーチファクトがある。そのため、金属をどのくらいロボットに使用できるのか検討しなければならない。また、ロボットには、電極針の微調整や非常事態時に医師がロボットを止めることができるようにバックドライブ性を確保する。バックドライブ性は一般的に減速比ができるだけ低いほうが高い。そのため、バックドライブ性を確保するために減速比はできるだけ低く設定する必要がある。そして、ロボットの位置/姿勢精度について考える。電極針によってがん細胞を確実に死滅できるのは電極針の先端周囲2cmである。そのため、IVRロボットには高い穿刺精度が求められる。今回のIVRロボットでは、電極針の位置精度1mm、ロボットの手先の位置精度0.5mmが目標である。最後に、電極針穿刺時に反力が発生するためそれを考慮した手先抗力が必要である。手先目標抗力は10Nとする。

2.2 DUAL デルタ型パラレルリンク

ロボットの機構には、パラレルリンク機構を提案する。パラレルリンク機構とは、並列にリンク機構を制御して1点の動きを決めるリンク機構 [4] のことで、シリアルリンクと比較すると手先精度と手先剛性が高い。また、CT撮影断面から離してモータを配置できるためアームの軽量化やモータによるアーチファクトを避けることができる。これらの点から、パラレルリンク機構は、IVRロボットに適している。

ロボットの関節部分では、回転ジョイントを用いたアームを設計する。一般的にパラレルリンクロボットでは、関節が滑らかに動くためボールジョイントを用いたアームが多いが、ボールジョイントは可動角が狭く、高トルクに耐えられないという欠点がある。一方で、回転ジョイントは一般的に特異点が多いという欠点があるが、可動範囲は広く、トルクにも強い。

本研究では、図3に示すような3自由度デルタ型パラレルリンクを2つ重ね合わせた構造を持つDUALデルタ型パラレルリンクを採用する。3自由度デルタ型パラレルリンクは、デルタ型の構造になっており、3つのアームにより手先の位置を制御している。デルタ型とは、モータの回転軸方向と手先ジョイントの回転軸方向が常に平行になっているため手先をベースプレートに対して平行に動かすことができる構造のことである。また、手先部分では図4に示すように、ひとつは針の上部、もう一つは針の下部を把持しており、それぞれの手先の位置を制御することによって針の位置と姿勢を制御することができる。また、一般的にロボットは自由度が増えるほど制御は難しいが、DUALデルタ型パラレルリンクロボットは3自由度のパラレルリンクを重ねた構造になっているため制御は比較的簡単である。

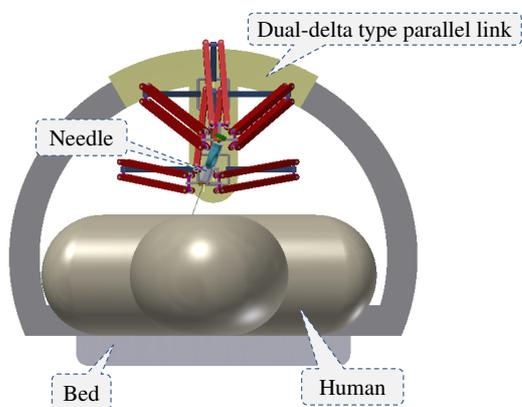


Fig. 3 Robotic IVR

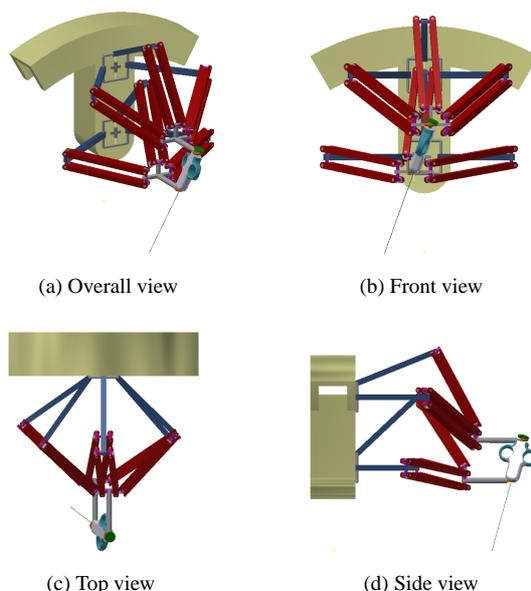


Fig. 4 Dual delta-type parallel link

3. モデル化

3.1 逆運動学

3自由度デルタ型パラレルリンクについて逆運動学解析を行う [4], [5]. 図5に機構図を示す。手先の座標を (x, y, z) , それぞれのベースジョイント B_1, B_2, B_3 の座標を $(a_1, 0, 0)$, $(0, 0, a_2)$, $(-a_3, 0, 0)$, 角度をそれぞれ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, アームの第1リンクの長さを l_1 , 第2リンクの長さを l_2 として逆運動学を解く。図5から各アームの第1リンクの先端の関節の座標は $(a_1 + l_1 \cos \theta_1, l_1 \sin \theta_1, 0)$, $(0, l_1 \sin \theta_2, a_2 - l_1 \cos \theta_2)$, $(-a_3 + l_1 \cos \theta_3, l_1 \sin \theta_3, 0)$, 第2リンクの先端の関節の座標は $(x + r_2, y, z)$, $(x, y, z + r_2)$, $(x - r_2, y, z)$ となる。

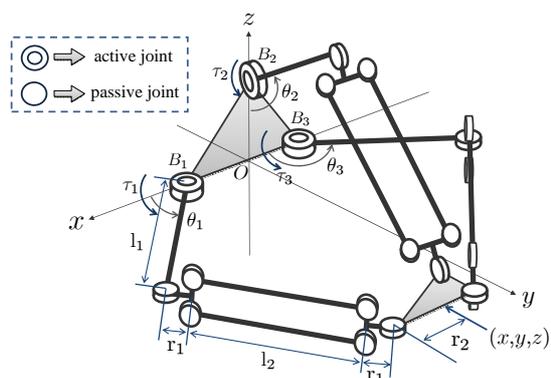


Fig. 5 Structure of parallel link

距離と腕の長さの関係から次の(1)~(3)の式が得られる。

$$(x + r_2 - a_1 - l_1 \cos \theta_1)^2 + (y - l_1 \sin \theta_1)^2 = \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - z^2}\right)^2 \quad (1)$$

$$(z + r_2 - a_2 + l_1 \cos \theta_2)^2 + (y - l_1 \sin \theta_2)^2 = \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - x^2}\right)^2 \quad (2)$$

$$(x - r_2 + a_3 - l_1 \cos \theta_3)^2 + (y - l_1 \sin \theta_3)^2 = \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - z^2}\right)^2 \quad (3)$$

これを(4)~(6)のようにまとめる.

$$A_1 \cos \theta_1 + B_1 \sin \theta_1 = C_1 \quad (4)$$

$$A_2 \cos \theta_2 + B_2 \sin \theta_2 = C_2 \quad (5)$$

$$A_3 \cos \theta_3 + B_3 \sin \theta_3 = C_3 \quad (6)$$

ただし,

$$A_1 = x + r_2 - a_1$$

$$B_1 = y$$

$$C_1 = \frac{A_1^2 + B_1^2 + l_1^2 - \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - z^2}\right)^2}{2l_1}$$

$$A_2 = -(z + r_2 - a_2)$$

$$B_2 = y$$

$$C_2 = \frac{A_2^2 + B_2^2 + l_1^2 - \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - x^2}\right)^2}{2l_1}$$

$$A_3 = x - r_2 + a_3$$

$$B_3 = y$$

$$C_3 = \frac{A_3^2 + B_3^2 + l_1^2 - \left(2r_1 + \sqrt{l_2^2 - z^2}\right)^2}{2l_1}$$

とする.

これを解くと次のように求められる.

$$\theta_1 = \text{atan2}(B_1, A_1) \pm \text{atan2}\left(\sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}, C_1\right) \quad (7)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(B_2, A_2) \pm \text{atan2}\left(\sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}, C_2\right) \quad (8)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(B_3, A_3) \pm \text{atan2}\left(\sqrt{A_3^2 + B_3^2 - C_3^2}, C_3\right) \quad (9)$$

それぞれ2つずつ解をもつので, 第1リンクが外側を向く角度を採用すると以下ようになる.

$$\theta_1 = \text{atan2}(B_1, A_1) - \text{atan2}\left(\sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}, C_1\right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(B_2, A_2) + \text{atan2}\left(\sqrt{A_2^2 + B_2^2 - C_2^2}, C_2\right) \quad (11)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(B_3, A_3) + \text{atan2}\left(\sqrt{A_3^2 + B_3^2 - C_3^2}, C_3\right) \quad (12)$$

4. 実機製作

本研究では, 3自由デルタ型パラレルリンクロボットの製作を行った. 各リンクのパラメータを表1に示す. ロボットの材質には, 重量と強度を考慮してアルミニウムを用いた. モータの動力伝達では, ギアによって間接的に駆動させている. また, 関節部分では, 回転軸にオフセットを持たせることでリンク同士の干渉を防ぎ, 可動範囲を大きくした. 実際に製作した3自由デルタ型パラレルリンクロボットを図6に示す.

Table 1 Link parameter

Symbol	Meaning	Value
a_1 [mm]	Length of $\overrightarrow{OB_1}$	52
a_2 [mm]	Length of $\overrightarrow{OB_2}$	81.88
a_3 [mm]	Length of $\overrightarrow{OB_3}$	52
l_1 [mm]	The 1st link length	150
l_2 [mm]	The 2nd link length	150
r_1 [mm]	Offset of 2nd link	20
r_2 [mm]	Offset from end-effector to joint	44.5

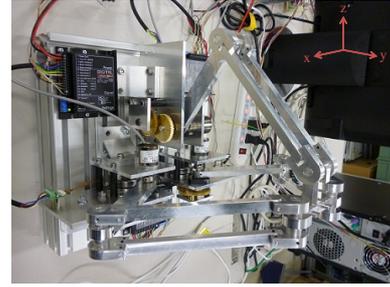


Fig. 6 Delta-type parallel link mechanism with three DOF

5. ロボット制御

5.1 制御システム

図7にパラレルリンクロボットの制御システムを示す. モータの角度をエンコーダにより計測し, モータのトルク, 指令電圧を求める. モータドライバにより指令電圧に比例した電流をモータに与える. モータはmaxon社製 EC flat 45 DC サーボモータ, エンコーダは RE30E-500-213-1, モータドライバは maxon社製 motor control 1-Q-EC Amplifier DEC 50/5 を用いる.

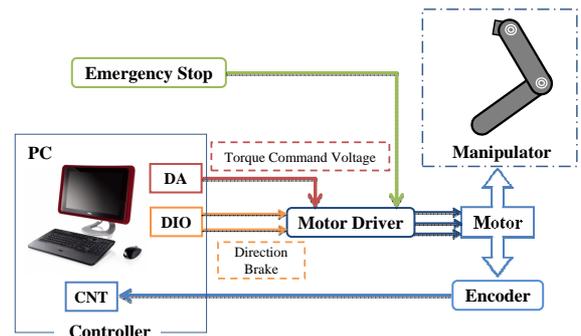


Fig. 7 Control system

5.2 制御則

回転軸の入力トルクを求める. ベースジョイントの角度を $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, 目標角度を $\theta_d = [\theta_{d1} \ \theta_{d2} \ \theta_{d3}]^T$ として, 制御を行うと各回転軸のトルク $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ は以下のように表される.

$$\tau = k_p (\theta_d - \theta) - k_d \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

ここで, k_p は比例ゲイン行列, k_d は微分ゲイン行列である.

6. 基礎実験

パラレルリンクロボットの基礎的な動作の確認と手先精度の検証を行った。ロボットの姿勢は図 6 の状態でを行った。

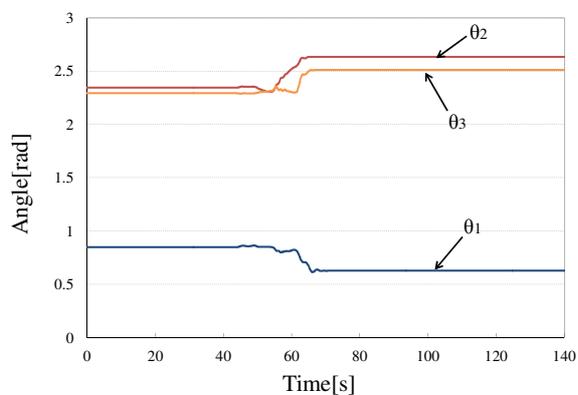
6.1 初期位置精度の検証

各ベースジョイントに初期角度を与え、拘束なしで初期角度状態を保つことができるか検証した。

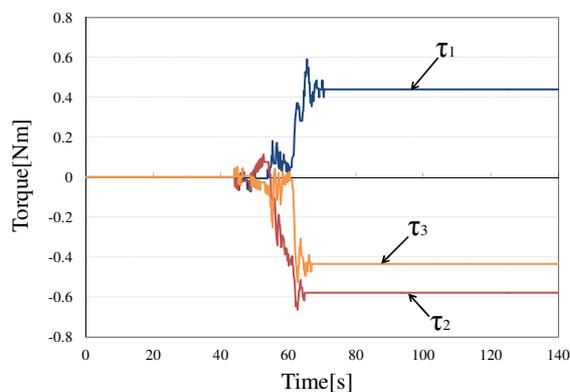
実験手順を以下に示す。

1. 初期角度を設定する。 ($\theta_1=0.85[\text{rad}]$, $\theta_2=2.34[\text{rad}]$, $\theta_3=2.29[\text{rad}]$)
2. 初期角度の状態で手先を固定する。
3. 一定時間後に手先の拘束を外す。

ゲインをそれぞれ $k_p=2.0$, $k_d=0.2$ として実験を行った。実験結果を図 8 に示す。図 8(a) では、それぞれのベースジョイントの角度の変化を表し、図 8(b) では、回転軸のトルクの変化を表している。



(a) Angle



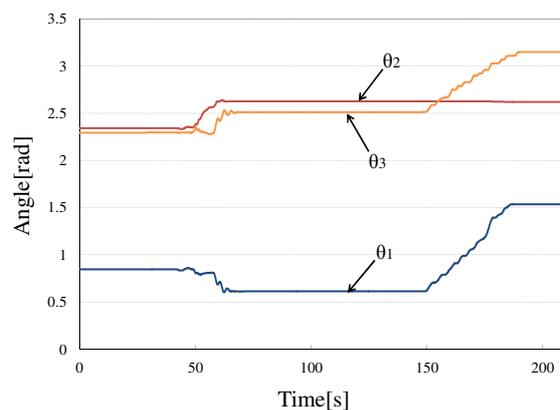
(b) Torque

Fig. 8 Experiment for gravitainal compensation

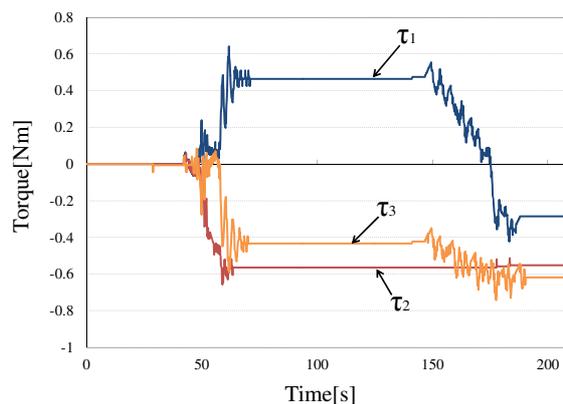
実験結果からアームによって手先を維持できていることがわかる。しかし、図 8(a) を見てわかるように拘束を外した場合に初期角度に対してかなり誤差が生じている。今回の実験では、アームの重力を考慮していないためこのような誤差が生じてしまったと考えられる。

6.2 角度変化による手先精度の検証

アームによって手先を維持させた状態から θ_1 と θ_3 を $+0.005[\text{rad}]$ ずつ変化させて手先精度を検証した。前の実験と同じようにゲインをそれぞれ $k_p=2.0$, $k_d=0.2$ として実験を行った。実験結果を図 9 に示す。



(a) Angle



(b) Torque

Fig. 9 Experiment for angular variation

実験結果より 150[s] 付近から θ_1 と θ_3 の角度が変化していることがわかる。図 9(a) を見ると、現状では角度はなめらかに変化しなかった。これも前の実験と同じで重力補償を適用していないことが要因であると考えられるため、重力を考慮した実験を行う必要がある。

7. 結 言

本論文では、パラレルリンク機構を用いたロボティック IVR を提案し、実際に 3 自由度デルタ型パラレルリンクロボットを製作した。さらに、基礎実験を行い、動作の確認と手先精度の検証を行った。今後は重力を考慮した実験を行い、手先精度を検証する必要がある。また、逆運動学の解を利用し、ロボットの手先を自由に操作できるように開発を進めていく。

文 献

- [1] 日本 IVR 学会, “<http://www.jsivr.jp/>”
- [2] Daniel Glozman and Moshe Shoham, “Image-Guided Robotic Flexible Needle Steering”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 23, NO. 3, pp. 459-467, 2007.
- [3] Benjamin Maurin, Christophe Doignon, Jacques Gangloff, Bernard Bayle, Michel de Mathelin, Oliver Piccin, Afshin, “CTBot : A Stereotactic-Guided Robotic Assistant for Percutaneous Procedures of the Abdomen ”
- [4] 鈴森 康一, “ロボット機構学”, コロナ社, 2004.
- [5] John J. Craig, “ロボティクスー機構・力学・制御ー”, 共立出版, 1991.