

ロボティックIVRにおけるマニピュレータと周辺環境との接触判定アルゴリズム

○城戸 優希（岡山大），松野 隆幸（岡山大），亀川 哲志（岡山大），
平木 隆夫（岡山大），見浪 護（岡山大）

1. 緒言

我々は、CT透視下IVR用針穿刺ロボットを開発している。ロボットは6自由度の動作が可能で、術者が遠隔よりマスター・コントローラを操作することにより、CT透視下の針穿刺が可能である。本ロボットを使用すれば、手ブレのない正確な針穿刺が術者被曝ゼロで可能となる[1][2]。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などの周辺機器と接触した場合、ロボットが周辺機器を傷つけてしまう可能性がある。そのため、目視で監視をする人員を用意しており、術者は接触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うという問題に対して、ロボットと周辺環境との接触判定アルゴリズムを提案する。

2. Zerobot

開発したZerobotの外観と手先部の拡大図を図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、ロボットアームにパラレル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。

2.1 CTガントリ内の作業空間

図2に示すように、ガントリ内壁は直径720mmの円柱状である。その円柱の中のベッドに患者が寝て、撮影する。限られた作業空間内で、患者とガントリに当たないようにロボットを穿刺を行う姿勢に操作することは注意を要する。現在は穿刺前にガントリとロボットの近くで術者が針先と患者の距離およびロボットとガントリの干渉に注意しながらロボットを動作させるため時間がかかる。また、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、ガントリとロボットの相対的な位置、姿勢が毎回異なる。そのため、ロボットの操作に制限を設け、ガントリに衝突しないように制御することはできない。

3. 順運動学

本節ではロボットの各関節の角度および変位 \mathbf{q} から針の姿勢、針先位置 wP_E を計算するため、順運動学の

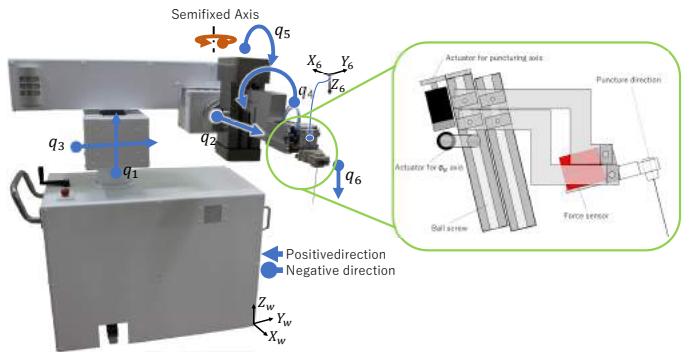


図1 Zerobot の外観

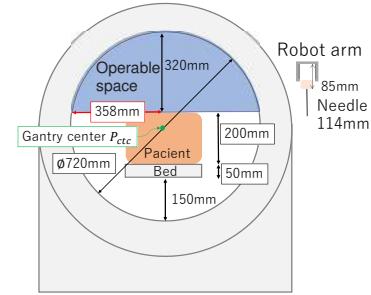


図2 Zerobot の作業空間

式を導出する。Zerobotは6つの駆動軸を持つ。6つの駆動軸の角度 [degree] および変位 [mm] をそれぞれ q_1, q_2, \dots, q_6 とおく。関節の駆動方法は表1のとおりである。

表1 関節の駆動方法

軸	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
駆動方法	直動	直動	直動	回転	回転	直動

3.1 ロボットのワールド座標系 Σ_W から針先 Σ_E までの同次変換行列の導出

まず、同次変換行列に必要なロボット手先部の座標系を図3のように配置する。ワールド座標系から針先位置までの同次変換行列 wT_E は式(1)のように表す。

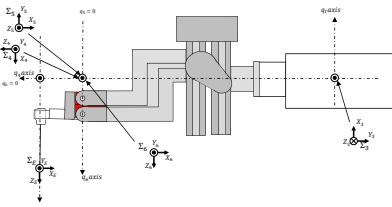


図3 ロボット手先部の座標系の位置

$$\begin{aligned} {}^w \mathbf{T}_E &= {}^W \mathbf{T}_0 {}^0 \mathbf{T}_1 {}^1 \mathbf{T}_2 {}^2 \mathbf{T}_3 {}^3 \mathbf{T}_4 {}^4 \mathbf{T}_5 {}^5 \mathbf{T}_6 {}^6 \mathbf{T}_E \\ &= \begin{bmatrix} -C_{q_5} & 0 & S_{q_5} & {}^w x_E \\ -S_{q_4} S_{q_5} & C_{q_4} & S_{q_4} C_{q_5} & {}^w y_E \\ C_{q_4} S_{q_5} & S_{q_4} & -C_{q_4} C_{q_5} & {}^w z_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

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

4. マニピュレータと周辺環境との接触判定アルゴリズム

ロボット手先部とガントリなどの周辺機器との接触判定シミュレーションを作成する。接触判定アルゴリズムのフローチャートを図4に示す。ロボットの各要素の3次元のCADデータをSTLファイルに変換することにより、法線を有する3角形（3点）の集合として表現する。ロボットから現在の角度情報を取得し、手先位置座標系および各アーム部の座標系に変換する。ロボットの各要素をそれぞれの座標系に配置しワールド座標系から見た点群に変換する。ガントリとの接触判定では円柱外に存在する点群があるか否かで識別することができる。

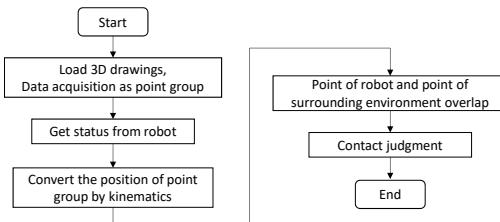


図4 接触判定アルゴリズムのフローチャート

5. 同次変換行列の作成

奥行方向に回転するB軸が動作したときに回転する部品とパラレルリンク機構の影響で回転せずに平行移

動する部品がある。パラレルリンク機構の部品は座標系の計算で使用したDenavit-Hartenberg法は使えない。そのため、式(2)のように工夫をしなければならない。座標系pと第6座標系の位置をそれぞれの機構の接合部分にする。そして、式(2)のようにすることでパラレルリンク機構はB軸の回転せずに、平行移動することができる。

$${}^w \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} & & & | \\ & {}^w \mathbf{T}_4 & & {}^w \mathbf{T}_6 \\ & | & | & | \\ - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

6. シミュレーション結果

作成した同次変換行列を適応させ、OpenGLに出力した様子を図5に示し、図6に2つの部品が接触判定された時のグラフを示す。 y_s, z_s はロボットを構成する点群であり、 y_G, z_G はガントリの中心である。ガントリを円筒とすると、半径は360[mm]であり、式(3)のように部品の各点がガントリ中心から360[mm]以上離れると、接触したと判定される。シミュレーション上で動かしたところ、接触と判定された部品は赤くなつた。2つの部品が接触したときのグラフから、パラレルリンク機構上部の部品以外はガントリ中心から360[mm]以上離れた点があり、接触判定ができたことを確認した。

$$360 \leq \sqrt{(y_s - y_G)^2 + (z_s - z_G)^2} \quad (3)$$

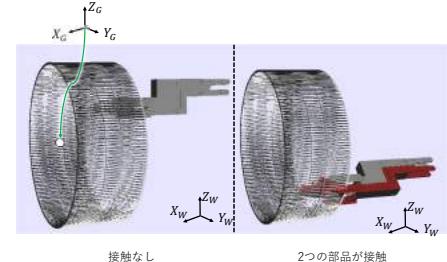


図5 OpenGLへの出力結果

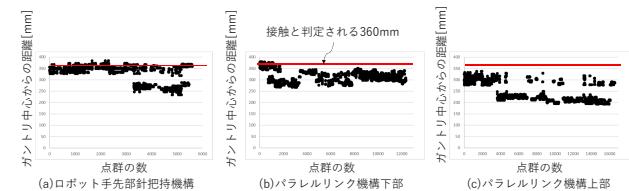


図6 2つの部品が接触している時のガントリ中心からの距離

参考文献

- [1] 日本IVR学会, "http://www.jsivr.jp/"
- [2] 岡山大学病院 放射線科, "http://www.ok-radiology.jp/"