

穿刺ロボットの事前手技計画における患者との接触検出シミュレーション

Simulation to Detect Collision with a Patient for a Puncture Robot on Preplanning of surgery

学 酒井 菜々子 (岡山大) 正 松野 隆幸 (岡山大)
 城戸 脩希 (岡山大) 正 亀川 哲志 (岡山大)
 平木 隆夫 (岡山大) 正 戸田 雄一郎 (岡山大)
 正 見浪 護 (岡山大)

Nanako SAKAI, Okayama University, ptct3vsm@s.okayama-u.ac.jp
 Takayuki MATSUNO, Okayama University
 Naoki KIDO, Okayama University
 Tetsushi KAMEGAWA, Okayama University
 Takao HIRAKI, Okayama University
 Yuichiro TODA, Okayama University
 Mamoru MINAMI, Okayama University

In recent years, interventional radiology (IR) which is a medical procedure has been attracting considerable attention. Since this surgical method is less invasive, the number of this surgery tends to increase. 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. When doctors operate by remote control, there is possibility that parts of the robot collide with peripheral devices or a patient. Especially, if in the case of collision with the patient, it could become a serious incident. Accordingly, it is important to build a suitable path plan of the needle insertion before the surgery. Doctors, however, currently, do not have methods to grasp the possibility of the collision. Therefore, a simulation which detect collision with a patient in the advanced planning is proposed in this paper. The effectiveness of proposed simulation is confirmed.

Key Words: Surgery assist, Surgical simulator, Puncture robot

1 緒言

近年, Interventional Radiology (IVR) と呼ばれる手術法が注目されている [1]. IVR は従来の外科手術と比較すると低侵襲であるが, CT 撮影時の放射線による医師の被曝が問題となっている. そこで我々は IVR 支援ロボットとして, 遠隔操作可能な穿刺ロボット (図 1) を開発した. 図 2 に手術環境を示す [2]. 遠隔操作にて手技を行う際, 医師はロボットの正確な位置・姿勢の把握が困難であり, ロボットと患者や周辺機器との接触が危惧される. 特に, 患者とロボットが接触した場合, 重篤な有害事象を引き起こす可能性があるため, 事前の手技計画における安全な穿刺経路の精察が重要となる. しかし, 検討すべき事項が多いため穿刺経路の選定には長時間要する上に, 現在, 事前手技計画において穿刺ロボットと患者が接触する可能性について知る手段が無い. そこで本稿では, 事前手技計画において穿刺ロボットと患者との接触を検出するシミュレーションについて提案し, 有効性を確認する.

2 穿刺ロボットと患者との接触検出シミュレーション

2.1 研究目的

穿刺ロボットを用いて手技を行う際, 遠隔からの操作となるため医師はロボットの正確な位置・姿勢の把握が困難であり, 患者や周辺機器との接触が懸念される. 現在は事前に手技計画を立て, 実際にロボットを用いて周辺機器と接触せずに穿刺目標に到達可能であるか確認を行っている. しかし, 周辺機器との接触は事前計画において確認できるが, 患者との接触については確認する手段が無い. そのため, 穿刺計画は数通り用意しており, その都度周辺機器との接触も考慮しなければならないため, 確認作業

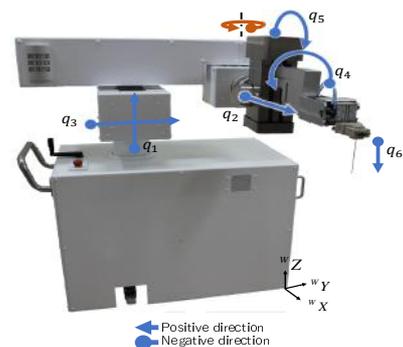


Fig.1 Remote operable puncture robot

には長時間要する. そこで, 術前の手技計画において危険な穿刺経路の把握が可能であれば, 事前手技計画の時間を短縮するだけでなく, より安全な穿刺経路にて手技を行うことができる. 本稿では, 平均的な体格を有する成人男性を想定し作成したロボットと患者との接触を検出するシミュレーションについて述べる.

2.2 シミュレーション概要

本稿では図 3 にあるように CT ガントリの中心に CT 座標系 Σ_{CT} を設定し, 奥行方向を X_{CT} , 横方向を Y_{CT} , 縦方向を Z_{CT} とする. また, 穿刺ロボットは CT ガントリに対して水平に設置されている. CT 座標系 Σ_{CT} とロボット座標系 Σ_W との関係

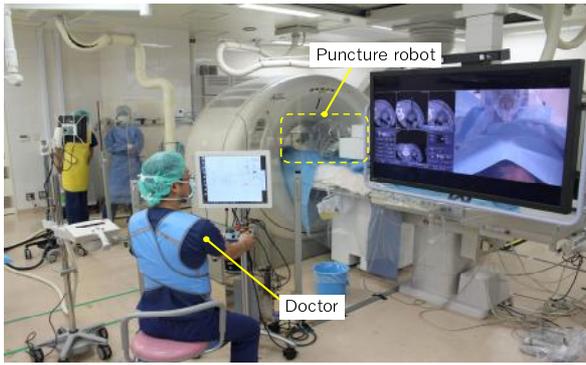


Fig.2 Scene of the surgery

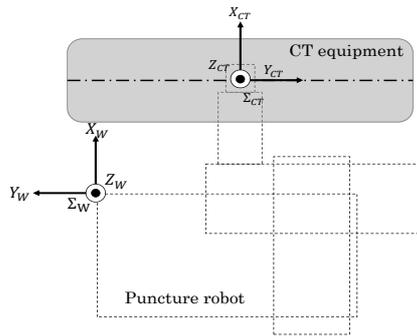


Fig.3 CT coordinate system and the robot coordinate system

図 3 に示す．なお本稿では，CT 座標系 Σ_{CT} は $Y_{CT}Z_{CT}$ 平面，ロボット座標系 Σ_W は Y_WZ_W 平面にて行い， X_W 方向の移動 (X 軸動作) 及び Y 軸回りの回転動作 (B 軸回転) については考慮しない．

図 4 に穿刺ロボットを用いた手技におけるロボットアーム部と患者の位置関係を示す．このとき，穿刺ロボットには患者との干渉が起こりやすい部分が複数存在する．患者との接触が危惧される部品としては，(a) 針把持機構，(b) ボールねじ下カバー，(c) A 軸付け根部の 3 つが挙げられる．これらの部品を接触が危惧される患者の部位と対応付けることで，接触検出を行う．そこで本稿では，患者の体格を平均的な日本人成人男性とし，身長 1700mm，穿刺位置を肺 (足底部から 1200mm の位置) と仮定する．体格データは人工知能研究センターの AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003 を参考にした [3]．このとき，先述した部品のうち針把持機構は胸部，ボールねじ下カバーは大腿部，A 軸付け根部は足底部の位置とそれぞれ接触する可能性がある．上記で得られた干渉が危惧される各部位を厚径と横径をもとに楕円と仮定し，接触検出シミュレーションを作成する．

図 5(a) はロボットを用いた実際の手技の様子である．このときの様子を CT 座標系の $Y_{CT}Z_{CT}$ 平面に描画し，患者を多角形で近似する (図 5(b))．図 6 はロボット座標系の Y_WZ_W 平面におけるロボットアーム部の概形を同様に CT 座標系の $Y_{CT}Z_{CT}$ 平面に描画している．多角形で近似した各部位に対して，それぞれ対応するロボット部品と接触検出を行う．接触を考慮すべき患者の部位のうち胸部のみ疑似生体の実際の CT 画像を用いている．また，実際の穿刺ロボットは単軸を用いて穿刺可能であり [4]，本シミュレーションは穿刺前後の針把持機構の位置についても接触が確認可能である．本シミュレーションは，穿刺開始点，穿刺目標，穿刺経路長，針の長さ，針の刺入角度を変更することができ，任意に設定することで穿刺経路が可視化される．針の長さは臨床にてよく使用される 114mm と 150mm の 2 種類から選択する．穿刺目標にてマウスの左ボタンを押下し，穿刺開始点にてマウス

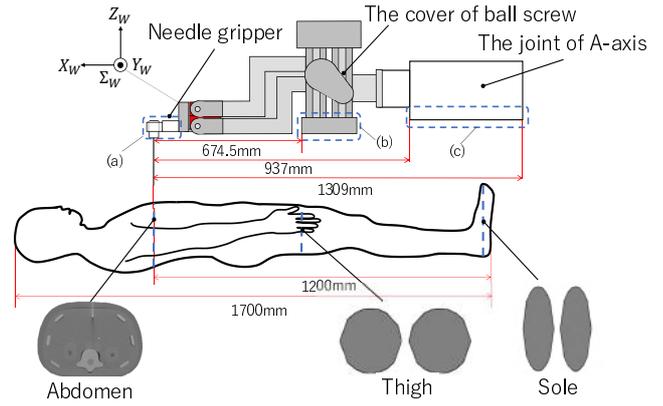
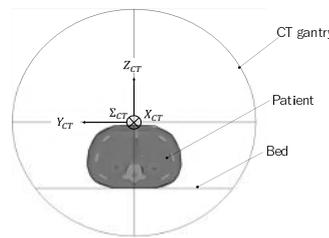


Fig.4 Appearance of the surgery using puncture robot



(a) Actual CT gantry



(b) Simulation for abdomen

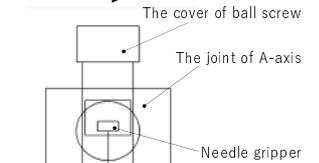
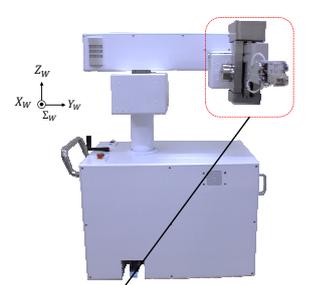


Fig.6 Appearance of the arm with the puncture robot

Fig.5 Appearance of path planning simulation

を離すことで穿刺経路が描かれ，そのときのロボットの各部品の位置・姿勢が描画される．さらに，このとき穿刺経路長，針角度 (A 軸回転角)，穿刺目標座標，穿刺前の針先位置，P 軸位置，現在の針先座標が出力される．

2.3 接触検出アルゴリズム

はじめに図 7 に示すように，ロボット部品を切断した多角形の隣り合う 2 点の座標 (x_{ri}, y_{ri}) , $(x_{r(i+1)}, y_{r(i+1)})$ を取得し，その 2 点を結んだ直線を直線 l_1 ，同様に患者上の隣り合う 2 点の座標 (x_{pj}, y_{pj}) , $(x_{p(j+1)}, y_{p(j+1)})$ を取得し，その 2 点を結んだ直線を直線 l_2 とする．このとき， (x_c, y_c) を l_1, l_2 の交点として式 (1) が成り立つ．ここで， i はロボット部品を近似した多角形の頂点の数であり，本シミュレーションでは $i = 4$ である．同様に， j は患者を近似した多角形の頂点の数であり， $j = 16$ としている．また，図 7 は $i = j = 1$ の場合である．

$$\begin{pmatrix} a_r & b_r \\ a_p & b_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_r \\ c_p \end{pmatrix} \quad (1)$$

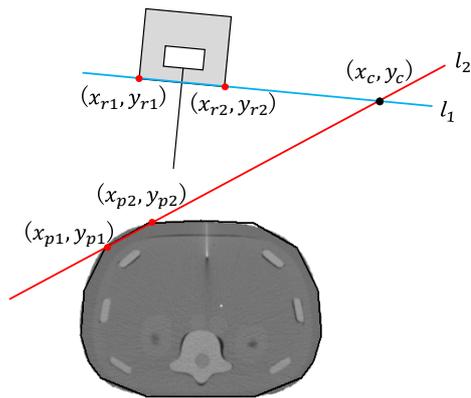


Fig.7 The method of calculating intersection

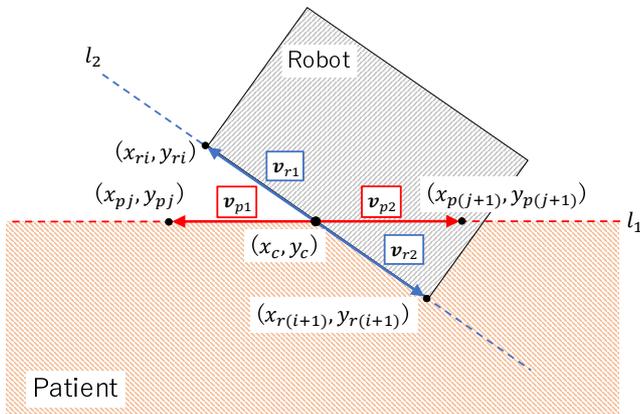


Fig.8 The method of detecting collision

$$\begin{aligned}
 a_r &= y_{ri} - y_{r(i+1)}, a_p = y_{pj} - y_{p(j+1)}, \\
 b_r &= x_{r(i+1)} - x_{ri}, b_p = x_{p(j+1)} - x_{pj}, \\
 c_r &= x_{ri}y_{r(i+1)} - x_{r(i+1)}y_{ri}, c_p = x_{pj}y_{p(j+1)} - x_{p(j+1)}y_{pj}
 \end{aligned}$$

$$\det A = \begin{vmatrix} a_r & b_r \\ a_p & b_p \end{vmatrix} \quad (2)$$

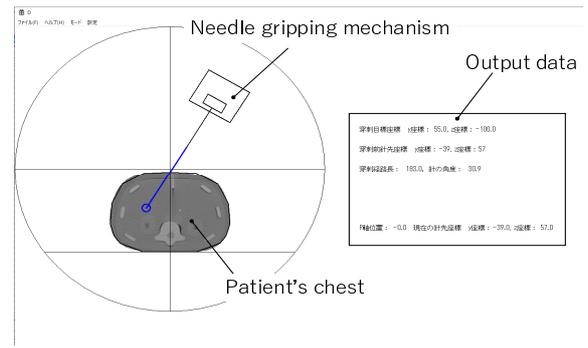
式(2)より, $\det A \neq 0$ のとき式(3)から交点 (x_c, y_c) が求まる.

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = -\frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} b_p & -b_r \\ -a_p & a_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_r \\ c_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

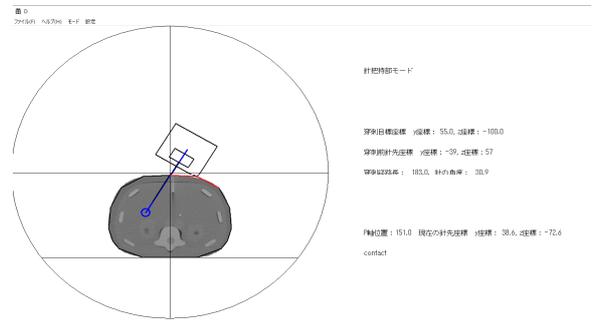
次に, 求めた交点と計算に用いたロボット及び患者上の座標を用いて, それぞれベクトルの内積を計算することでロボットと患者の接触を検出する. 計算に用いたロボット上の座標 (x_{ri}, y_{ri}) , $(x_{r(i+1)}, y_{r(i+1)})$ の間に求めた交点 (x_c, y_c) が存在する場合,

$$\mathbf{v}_{r1} \cdot \mathbf{v}_{r2} \leq 0 \quad (4)$$

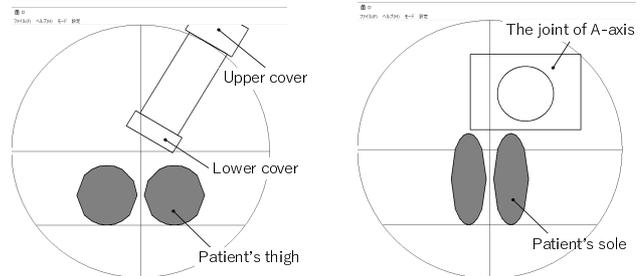
と表せる. ここではベクトルの内積を示す. 同様に, 計算に用いた患者上の座標 (x_{pj}, y_{pj}) , $(x_{p(j+1)}, y_{p(j+1)})$ の間に求めた交点



(a) Before puncturing



(b) After puncturing



(c) The cover of ball screw

(d) The joint of A-axis

Fig.9 Appearance of simulation in the case that collision detect for the needle gripping mechanism

(x_c, y_c) が存在する場合,

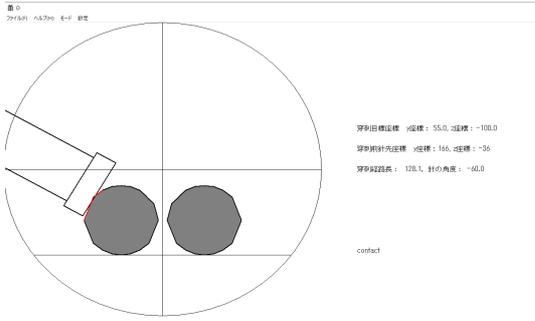
$$\mathbf{v}_{p1} \cdot \mathbf{v}_{p2} \leq 0 \quad (5)$$

となり, 式(4), (5)を同時に満たすとき接触と判定できる(図8). これをロボット部品の多角形上の隣り合う2点と患者を表す多角形上の隣り合う2点の全ての組み合わせに対して行う. 接触を検出した場合, 該当箇所の色を変更することで医師に通知する.

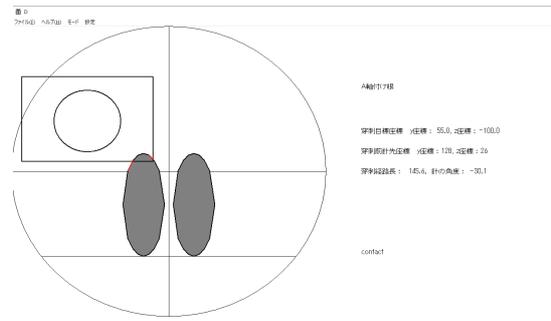
3 シミュレーション実行結果

ロボットを用いた穿刺において患者との接触を考慮する際, 大きく分けて以下の3つの状況が考えられる.

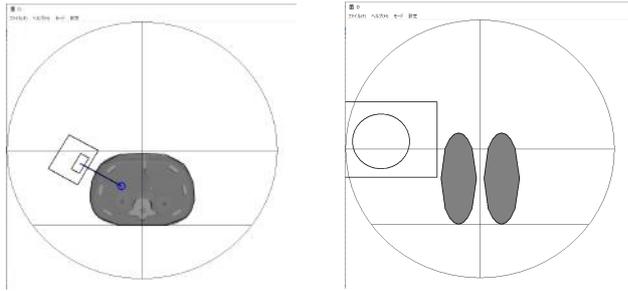
1. 穿針目標に到達する前に針把持機構が胸部と接触する場合



(a) The cover of ball screw

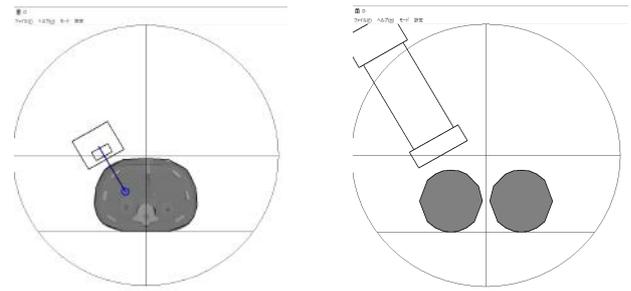


(a) The joint of A-axis



(b) The needle gripping mechanism (c) The joint of A-axis

Fig.10 Appearance of simulation in the case that collision detect for the needle gripping mechanism



(b) The needle gripping mechanism (c) The cover of ball screw

Fig.11 Appearance of simulation in the case that collision detect for the joint of A-axis

2. ボールねじ下カバーが大腿部と接触している場合
3. A 軸付け根部が足底部と接触している場合

穿刺目標を $(Y_{CT}, Z_{CT}) = (55\text{mm}, -100\text{mm})$ の位置, 針の長さは 114mm と仮定してシミュレーションを行う。また, 臨床にてロボットを使用する際は, 安全を考慮し患者の体表から少なくとも 10mm 以上針先を離れた地点から穿刺を開始するため, 針先が体表から十分離れた地点を穿刺開始点としている。

3.1 穿刺目標到達前に針把持機構が胸部と接触する場合

針把持機構と患者の胸部との接触は, 穿刺中に起こる可能性が最も高い。穿刺開始前の状態 (図 9(a)) から穿刺軸を動作させたとき, 穿刺目標座標 $(Y_{CT}, Z_{CT}) = (55\text{mm}, -100\text{mm})$ に対し, 針先位置が $(Y_{CT}, Z_{CT}) = (38.6\text{mm}, -72.6\text{mm})$ となっており, 針先が穿刺目標に到達する前に針把持機構が患者の胸部と接触していることがわかる (図 9(b))。また図 9(c), 9(d) より, このときボールねじ下カバーと大腿部及び A 軸付け根部と患者の足底部は接触していないことが確認できる。

3.2 ボールねじ下カバーが大腿部と接触している場合

針把持機構は患者と接触することなく穿刺目標に到達しているが, ボールねじ下カバーと大腿部が接触している場合を図 10(a) に示す。このとき, 図 10(b), 10(c) より針把持機構及び A 軸付け根部は患者と接触しない穿刺姿勢であることが確認できる。以上のような状況は穿刺開始前に起こり, 患者の大腿部はボールねじ下カバーと CT の寝台間に挟まれてしまう。

3.3 A 軸付け根部が足底部と接触している場合

3.2 節と同様に, 針把持機構が患者と接触することなく穿刺目標に到達しているが, A 軸付け根部が患者の足底部と接触している場合も考えられる (図 11(a))。このとき, 図 11(b), 11(c) より針把持機構及びボールねじカバーは患者と非接触であることがわかる。ボールねじ下カバーと同様に, 以上のような状況は穿刺開始前に起こり, 患者の足底部は A 軸付け根部と寝台の間に挟まれる危険性がある。

4 考察

シミュレーションの結果より, 患者とロボットが接触した際正しく接触検出が行えていることが確認できた。これまで, 事前手技計画の段階では周辺機器との接触は予測できても, 患者との接触を予測する手段が存在しなかった。そこで, 接触を考慮すべきロボット部品と患者の部位を対応付けることで, 事前手技計画段階における患者とロボットの接触検出を実現した。これにより, 事前手技計画に要する時間を削減できるだけでなく, 患者と接触しない適切な穿刺経路の選定が容易になると考えられる。

現在の接触検出シミュレーションの問題点として, 患者が標準的な体格の成人男性のみを想定していることが挙げられる。実際手技を受ける患者は女性や老人など体格が様々である。さらに, 同性であっても体格は個人差が大きいため, 現在のシミュレーションでは対応できないケースがある。解決策として, 実際の患者の CT 画像を取り込み, その都度患者を多角形で近似し接触判定を行うことで汎用性の高いシミュレーションになると考えている。

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.
- [3] 人工知能研究センター, " <https://www.airc.aist.go.jp/> "
- [4] 部矢明, 亀川哲志, 松野隆幸, 平木隆夫, 五福明夫, "CT ガイド下針穿刺ロボットの開発 第 4 報 手先機構の改良設計", 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015