

フローティング機構を用いた針のたわみ抑制アルゴリズム

Needle Bend Restrain Algorithms by Using a Floating Mechanism

○宮本 隆晃 (岡山大) 正 松野 隆幸 (岡山大)
 村上 輝 (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)
 見浪 護 (岡山大)

Takaaki MIYAMOTO, Okayama University, p8gz182i@s.okayama-u.ac.jp

Takayuki MATSUNO, Okayama University

Hikaru MURAKAMI, 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, but 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. We are currently developing an automated puncture system. Deviation of puncture point on body surface causes needle deflection during the automatic puncture. Because the needle deflection grows with the inserted depth, it makes the needle difficult to reach the target tumor. So as to solve them, the floating mechanism is developed to suppress needle deflection. Displacement sensor on floating mechanism can measure the movement of the floating part. In addition, the puncture reaction force can be measured by the force sensor on the robot. Algorithms to suppress the needle deflection using this information are proposed in this paper.

Key Words: Surgery support, Mechanism, Puncture robot

1 緒言

Interventional Radiology (IVR) と呼ばれる手術法があり、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と文献 [1], 文献 [2] に述べられている。この手技は従来の外科手術と比較すると低侵襲であるため、局部麻酔での治療が可能である。しかし術者は CT ガントリの近くで手技を行うため、CT 撮影時の放射線による医師の被ばくが問題視されている。そこで我々は IVR 支援ロボットとして、図 1 に示すように遠隔操作可能な穿刺ロボットを開発している。現在、医師の技術差によらず手技を成功させるために、ロボットの自動穿刺に関する研究を行っている。自動穿刺中、体表穿刺点のずれにより針のたわみが発生する。このたわみが穿刺中に増大することで、標的への穿刺が困難になる。そこで針のたわみを抑制することを課題としている。本研究では、針のたわみを解消するためのフローティング機構を開発した。フローティング機構は針の変形に対する復元力を利用してたわみを抑制する。また、変位センサを取り付けることで、フロート部の移動量を計測を可能にした。さらに、図 2 に示す穿刺ロボットのエンドエフェクタの手前に取り付けられた力センサにより穿刺反力を計測できる。これらの情報を用いて針のたわみを抑制するアルゴリズムを提案し、有用性を実験により確認する。

2 フローティング機構を用いた針のたわみ抑制方法

2.1 研究目的

穿刺ロボットの自動穿刺による際、問題となるのが針のたわみの発生である。生体穿刺時における針のたわみについての CT 画像を図 3 に示す。医師による穿刺と違い、穿刺ロボットによる穿刺は針の持ち替えができないため穿刺ロボットが体表を貫く際に発生したたわみを抑制することができない。その後穿刺を進めると、針の進行方向と穿刺軸により針を押し進める力の方向が一致しないため、たわみが増加していき目標位置への穿刺が難しくな

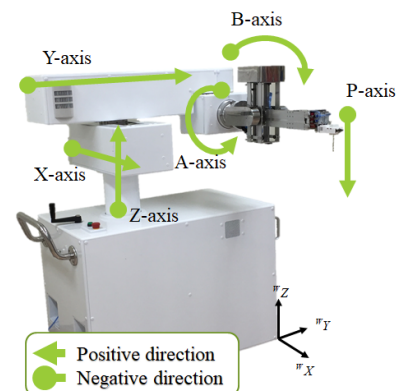


Fig.1 Appearance of Zerobot

る。この問題を解決することを研究目的とし、たわみを抑制する機構を穿刺ロボットのエンドエフェクタに採用した。

2.2 たわみ抑制機構

たわみを抑制するために設計した機構を図 4 に示す。この機構は L 字ブラケットの下部にエアシリンダを配置し、側部にリニアガイドを配置した。さらにリニアガイドのフロート部に針把持用の構造を配置し、その構造の位置を知るためにレーザー距離センサを配置した。次にこれらの構造の内、たわみ抑制に大きく関わるリニアガイドとエアシリンダについての説明をする。

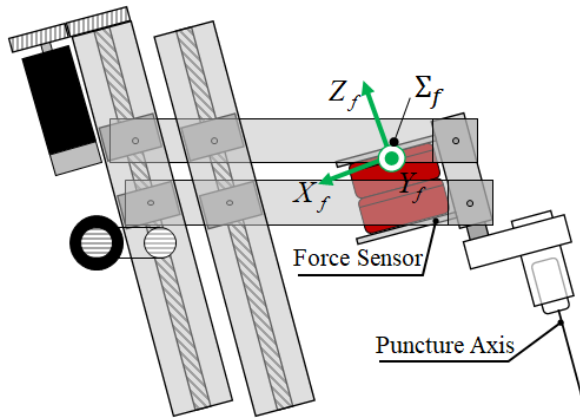


Fig.2 Force sensor mounted on Zerobot

クが最大の時に針把持部に接触する。この接触により摩擦を生みだしリニアガイド上を滑る動きを抑えることで針把持部の固定を行った。

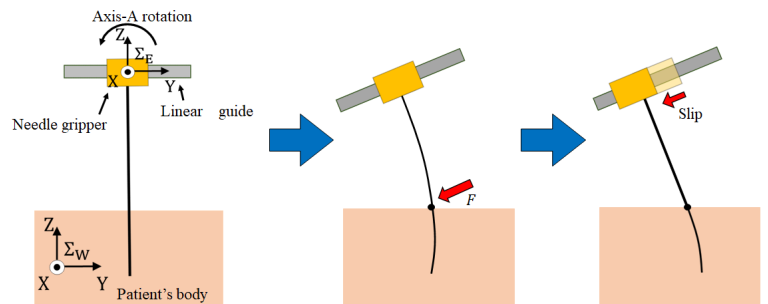


Fig.5 Linear guide system

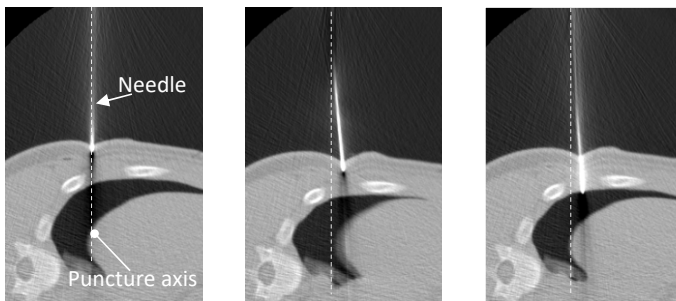


Fig.3 Needle deflection during biopsy

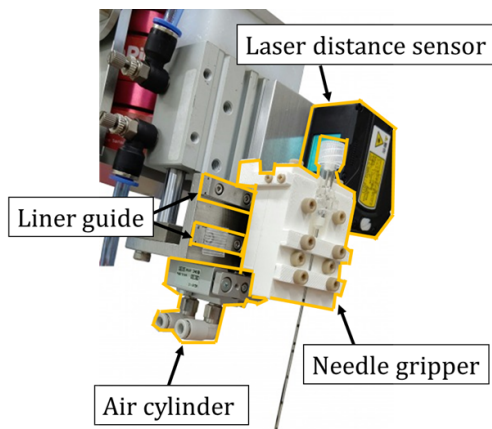


Fig.4 New designed mechanism

2.3 機構説明

図5に示したリニアガイドを用いた構造は、 ${}^W Y^W Z$ 平面のたわみを取り除くための構造である。体内に穿刺した針にA軸まわりの回転動作等の操作によりたわみが発生した場合、針には元の状態に戻ろうとする力が発生する。この復元力により、リニアガイド上の可動域の中心を原点とした座標系EのY軸方向を針把持部が滑ることなたわみを取り除くという機構である。リニアガイドを用いた構造を用いて穿刺する際、針把持部が動いてしまい正確な穿刺が行えないため針把持部を固定する必要がある。今回、針把持部を固定するためエアシリンダを用いた。図6に示すようにL字アングルの下部に配置したエアシリンダは、ストロー

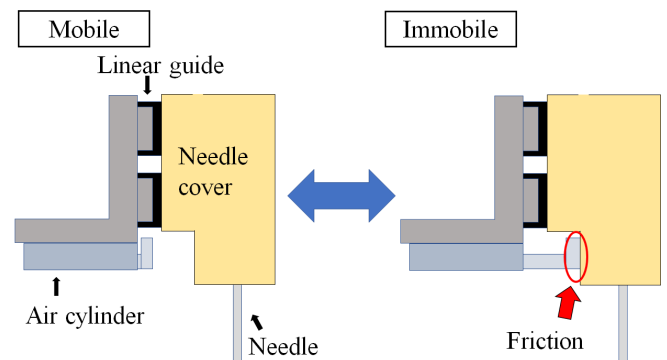


Fig.6 Fixing system using air cylinder

3 針のたわみ抑制アルゴリズム

針把持部はリニアガイド上を移動して針のたわみを抑制する。リニアガイド上の可動域を超えた場合、同じ方向のたわみを抑制することができない。さらに針把持部が移動したことでロボットの針の認識位置と実際の位置に差が生じてしまうため、常に針把持部を初期位置であるリニアガイドの中央に位置している必要がある。本章ではこの針位置修正を含めた針のたわみ抑制アルゴリズムを説明する。

3.1 針把持部の位置修正

針把持部の位置を修正するためには現在の針把持部の位置を取得する必要がある。位置の取得のためにレーザ距離センサを図4に示す位置に設置した。針把持部の初期位置をリニアガイド上の可動域の中心とし、レーザ距離センサの検出距離を考慮して針把持部の可動域を ${}^E Y$ 軸上の-10mmから10mmの範囲とした。ロボットに動作を指令することでたわみを解消した状態を維持しながら針把持部を初期位置に戻す。たわみを解消したときの針把持部の位置を図7とする。針把持部の移動距離である l はレーザ距離センサにより測定することができる。リニアガイドの傾き θ を考慮すると、位置修正のための針把持部の移動すべき値は ${}^W Y$ 軸方向を y 、 ${}^W Z$ 軸方向を z とすると三角関数を用いて式(1)、式(2)と表せる。

$$y = l \cos \theta \quad (1)$$

$$z = l \sin \theta \quad (2)$$

針把持部をこのように動かすためにはリニアガイドを固定している穿刺ロボットの移動すべき値は^WY軸方向を y_{rob} , ^WZ軸方向を z_{rob} とすると式(3), 式(4)となる.

$$y_{rob} = -l \cos \theta \quad (3)$$

$$z_{rob} = -l \sin \theta \quad (4)$$

以上により今回提案するたわみが発生した場合の針のたわみ抑制アルゴリズムは以下の手順となり, フリーチャートを図8に示す.

1. エアシリンダによる固定を解除する
2. 針把持部がフロート部を滑りたわみを抑制する
3. レーザ距離センサにより針把持部の移動距離を測定する
4. 移動距離をもとに針把持部を初期位置に戻す
5. 動作停止後たわみの有無を確認する
6. エアシリンダによる固定を再開する

手順5にて動作停止後のたわみがある場合は手順3からの位置修正のための手順を再び行い, たわみがない場合は手順6へと進む.

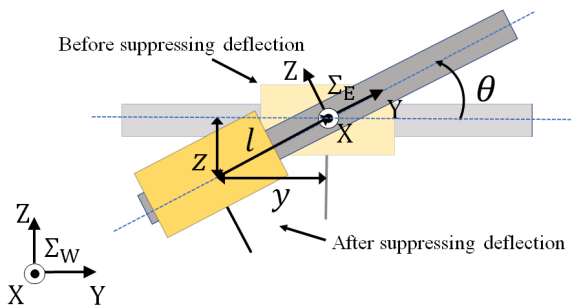


Fig.7 Movement commanded after deflection suppression

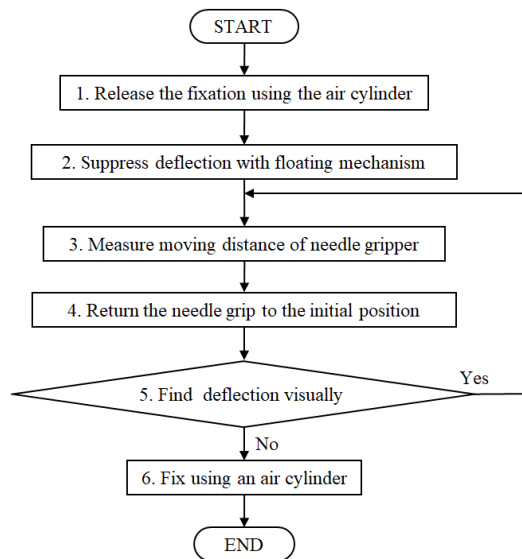


Fig.8 Needle bend restrain algorithms by using a floating mechanism

4 アルゴリズムの検証実験

4.1 実験手順

前述した針のたわみ抑制アルゴリズムの有用性を示すために以下の手順で実験を行った. 図9に実験で使った針である生検導入針(19G 114mm)と穿刺したファントムと呼ばれる疑似生体を示す.

1. 疑似生体に針を40mmだけ穿刺する
2. A軸方向に10°傾けることでたわみを発生させる
3. エアシリンダによる固定を解除する
4. 針把持部の動作停止を待つ
5. 穿刺ロボットに位置修正を実行する
6. エアシリンダによる固定を再開する

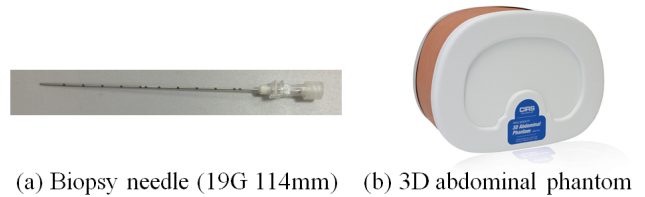


Fig.9 Equipment used in the experiment

4.2 実験結果

上記の手順で実験を行った際のたわみの変化を図10に示す. 図10にて(a)が穿刺終了時, (b)がたわみ発生時, (c)がたわみ解消時, (d)が位置修正時の状態を表している. また, それぞれに点線で穿刺ロボットの針の穿刺軸を示しており, (b)で発生させたたわみによるずれを(c), (d)を経て解消させ穿刺軸と針の軌道を一致させることができた. 次にこの実験での穿刺ロボットの針の位置姿勢を示したパラメータ, 力センサ, レーザ距離センサにより取得した針把持部の位置の関係から針のたわみ抑制アルゴリズムの評価を行う. 図11はA軸の角度と針把持部の位置についての関係を表した図である. この図で注目すべき部分は(a)と(b)間のA軸まわりに回転させた部分である. 針把持部の位置はA軸まわりに回転後の停止状態では10°傾いているにもかかわらず一定の値である. これによりエアシリンダの固定は正しく機能していることがわかる. 図12はロボットのY軸方向にかかった力 F_y と針把持部の位置についての関係を表した図である. (a)と(b)間の回転動作により発生したたわみにより F_y は急激に増加した. その後エアシリンダの固定を解除した(b)と(c)間では, 針把持部の位置はたわみを解消するために移動した. このたわみの減少により F_y は減少している. そして(c)と(d)間の初期位置に戻す動作にて F_y は増加することがなかったためフローティング機構を用いた針のたわみ抑制機構が正しく機能していることがわかる. 最後に図13はロボットのY座標の位置と針把持部の位置についての関係を表した図であり, 表1に(a), (b), (c), (d)各状態の針把持部の位置の値を示す. 注目すべき部分は(c)と(d)間の位置修正の動作の部分である. 今回位置修正のための動作を2回行ったためロボットのY座標の位置は2回変化している. そして表1の穿刺後である(a)と位置修正後の(d)の針把持部の位置の値から, 位置修正により初期状態とおおよそ同位置に戻っているため位置修正のための動作が正しく機能していることがわかった.

Table 1 Needle grip position value in each state

Needle gripper status	(a)	(b)	(c)	(d)
Needle gripper position[mm]	-0.02	0.04	-9.80	-0.08

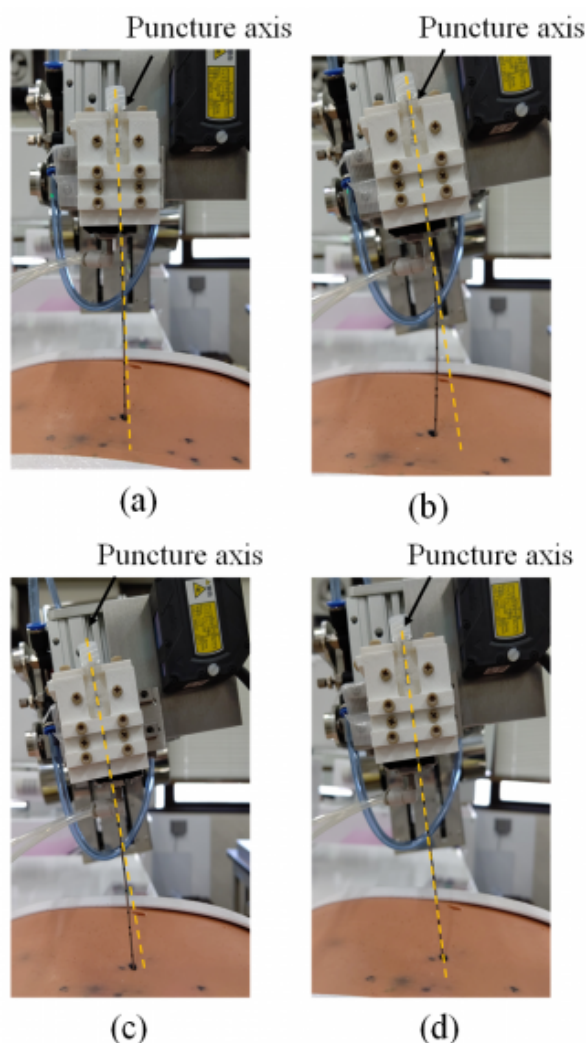


Fig.10 Changes of deflection in the experiment

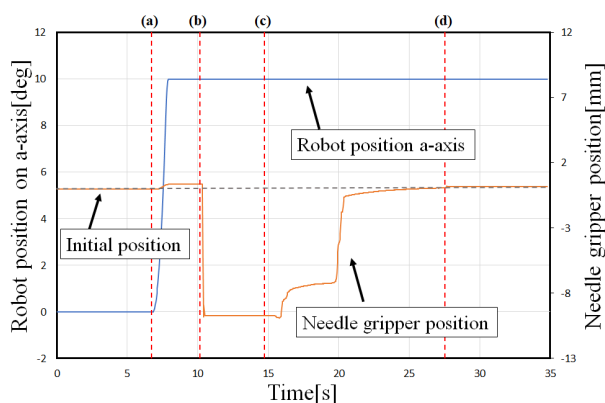


Fig.11 Relationship between robot position a-axis and needle gripper position

5 結言

実験により、リニアガイド及びエアシリンダを用いた針のたわみ抑制機構や針把持部の位置の修正が正しく機能していることを

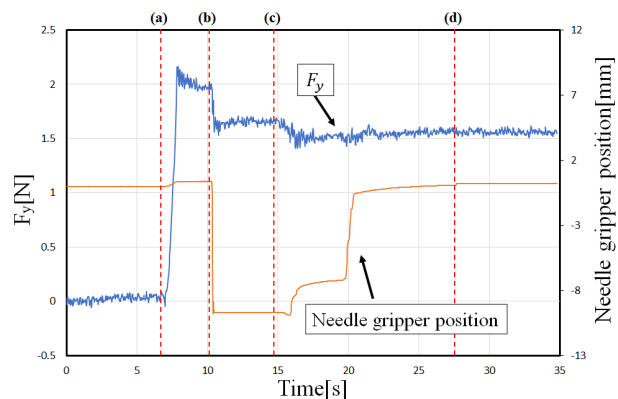


Fig.12 Relationship between F_y and needle gripper position

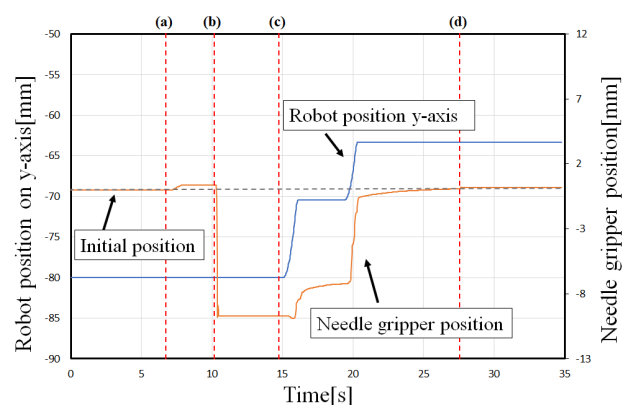


Fig.13 Relationship between robot position y-axis and needle gripper position

示すことができた。これにより今回提案したアルゴリズムの有用性を示すことができた。今後の研究の展望としては、今回提案したアルゴリズム後の針の状態の標的への穿刺が難なくできるかをCT画像により確認を行う。また、今回のたわみの抑制は ${}^WY^WZ$ 平面のたわみを取り除くものであったため3次元への拡張を行う。

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] 木村和志, 松野隆幸, 杉山晃平, 亀川哲志, 平木隆夫, 見浪護, “穿刺ロボットにおける針のたわみ力を用いた軌道生成”, JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2017(0), 1P1-I03, 2017
- [4] 村上輝, 松野隆幸, 木村和志, 亀川哲志, 平木隆夫, 見浪護, 戸田雄一郎, “穿刺ロボットにおける力センサ情報を用いた針の形状に関する研究”, JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019(0), 1P1-A02, 2019
- [5] 横内健人, 亀川哲志, 松野隆幸, 平木隆夫, 五福明夫, “CT 透視下針穿刺ロボットのための剛性可変グリップの性能評価”, ISIC システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 62, 8p, 2018-05-16