パラレルリンク型ロボットによる 超音波ガイド下穿刺支援システムの開発 —体表面衝突回避のための経路計画と穿刺精度評価—

Robotic assist system for Ultrasound-guided puncture with parallel-link

-Path generation for collision avoidance with body surface
and evaluation of puncture accuracy -

○学 夏目 薫 (農工大)
正 小野木 真哉 (農工大)

学 入澤 佐智恵 (農工大)
正 榊田 晃司 (農工大)

Kaoru NATSUME, Tokyo University of A&T, 50010257059@st.tuat.ac.jp University,
Sachie IRISAWA, Tokyo University of A&T
Shinya Onogi, Tokyo University of A&T
Kohji MASUDA, Tokyo University of A&T

One of the key issues of ultrasound-guided puncture therapy is the method for accurate positioning of a therapeutic device. We have been developing the parallel link robot system for positioning of the therapeutic device. However, there was a risk of collision between the robot and patient's body surface, because the shape of body surface was not taken into account in the conventional system. Therefore, we introduced a collision avoidance control into our system to determine the position of the device before treatment. Furthermore, we introduced a contact force control to keep the contact on the body surface using a force sensor. We performed a puncture evaluation experiment using this system. As the results, the puncture accuracy was about 1.6 mm in translation and about 0.6 deg in rotation. We confirmed the safe performance of the system to assist highly accurate puncture.

Key Words: Puncture therapy, ultrasound needle guidance, Collision avoidance, Contact force control

1. 緒言

切開手術や放射線治療を必要としない低侵襲性から、超音波ガイド下穿刺治療が注目を集めている。早期肝がんの標準的な治療法であるラジオ波焼却療法(radiofrequency ablation: RFA)[1]は、超音波診断装置で腫瘍の位置を確認しながら電極を差し込み、ラジオ波という電磁波による熱で腫瘍を凝固させる治療法であり、腫瘍が完全に壊死するまで複数回穿刺を行う。この療法は治療用デバイスの位置制御を複数回、正確に行うことが不可欠であるが、実現には術者の知識や経験に大きく依存していた。そこで先行研究では、超音波ガイド下穿刺治療を支援するロボットシステムが開発されている。例えば、マニピュレータームによる穿刺支援システム[2]は静脈穿刺支援を実現したが、穿刺針の自由度が小さく、可動範囲が狭いことから、刺入点変更に対応できないというデメリットがあった。また、5自由度を有するシリアルリンク型ロボットによる穿刺支援[3]は、刺入点変更に対応が可能である一方、大型、かつ重量(25kg)から、患者の急な動きや緊急時における安全性において問題があった。超音波ガイド下穿刺治療支援の為に治療デバイスの自由度が多く、刺入点変更が可能であること、また小型で軽量のロボットシステムが求められる。

我々はこれまで、6自由度を有し、2kg以下と軽量、かつ小型であるパラレルリンク型ロボット[4]による超音波器具の把持、位置決め制御を行ってきた。薬物伝送システム(Drug Delivery System: DDS)[5]に適用することを目指し、ロボットに超音波器具を把持させ、水槽中に設置された人工血管中を流れる微小気泡の誘導[6]等に成功した。しかし、患者の体表面形状が考慮されておらず、ロボットが患者に衝突する危険

性があった。そこで本研究では、パラレルリンクロボットによる超音波ガイド下穿刺支援を目指し、体表面への衝突を回避する衝突回避制御、および力センサを用いて体表面への接触を維持する接触制御を導入し、穿刺ガイドの位置決めを行うロボットシステムの開発・評価を行った。

2. 提案する治療システム

図1に治療システムの状態遷移図を示す。これらは4つの状態に分けられ、(A)まず、術者によって、3Dプローブを用いながら治療部位の3D超音波画像を取得し、術中治療計画を決定する。(B)次にロボットに治療デバイスを把持させ、導入した衝突回避制御によって体表面との衝突を回避する経路を生成し、ロボットを駆動させる。今回は穿刺支援の為にニードルガイドをロボットに把持させる。これは筒状になっており、術者がそれを通して針を挿入することを想定している。(C)次に接触制御によって治療デバイスを体表面へアプローチさせ、接触後、デバイスの動きを体動に追従させる。(D)最後に術者がニードルガイドを通して穿刺を行う。この(B)→(C)→(D)を繰り返すことで、治療位置変更にも対応可能である。

Fig. 1 Transition among 4 conditions of the system

3. 実験システム

本システムはニードルガイドの位置・姿勢を制御するパラレルリンク型ロボット、体表面形状取得および3Dプローブの位置情報取得に用いる光学式三次元位置計測センサ (Polaris Spectra, NDI, 以下位置計測センサ), 制御用 PC で構成される。各構成要素について以下に説明する。

図 2 に用いるパラレルリンク型ロボット[7]の外観を示す。ロボットは 3 本のマニピュレータアームとロボットとロボットの把持物を固定するニードルガイド保持部 (以下保持部) から構成される。

Fig.2 Parallel link robot

3 本のアーム先端にある各金属球体は磁石によって保持部と接続されボールジョイントとなっている。これによりアームの動作がスムーズにニードルガイドの位置・姿勢に反映されるようになっている。保持部は 6 軸の力センサ (WDF-6M200-3, ワコーテック) を有しており、ニードルガイドにかかる力を測定することが可能である。ロボットのキャリブレーションに関しては、各アームに取り付けた光学トラッカーによる計測値を用いて初期関節角及び、各アーム間の位置関係を同定することが可能である。

次に位置計測センサについて説明する。これは非接触かつ無線で広い範囲の位置計測が可能な装置であり、医療ナビゲーションを中心とする医療システムで広く用いられている。赤外線 LED と 2 体の赤外線カメラで構成されており、赤外線マーカの三次元位置を最大 60Hz の周期で計測可能である。なお、位置計測の公称誤差は 0.25 mm である。

次に制御用 PC について説明する。3D プローブを用いて取得した治療部位の 3D 超音波画像、および位置計測センサによって取得した体表面の位置形状、および 3D プローブの位置情報を基に術中治療計画を制御用 PC に内蔵される治療計画ソフトウェアにて決定する。その治療計画に基づいて衝突回避経路を生成し、ロボットの各モータに指令値を送信する。また力センサもシリアル通信によって制御用 PC と接続されており、計測されたニードルガイドにかかる力を制御に活かすことが可能である。

体表面形状計測には図 3 に示すように 24 個の赤外線マーカ球を布にとりつけた体表面形状計測トラッカー (以下腹部トラッカー) を用いる。各マーカ間の距離は 50 mm とし 4 行、6 列の配置とした。

Fig.3 Marker assembly for body surface measurement

4. システム制御アルゴリズム

4.1 衝突回避制御

図 1(B)で示した衝突回避制御アルゴリズムのフローチャートを図 4 に示す。衝突回避制御アルゴリズムは大きく分けて 2 つの要素から構成されている。1 つ目は体表面位置、形状計測であり、2 つ目は衝突回避経路生成である。各概念図を図 5 および図 6 に示す。まず前者では、①体表面に腹部トラッカーを設置し、位置計測センサにより各赤外線マーカ球の位置情報を取得する。②この点群に対し、ドロネー三角分割法[8]を用いて、面を再構築する。マーカ球の高さを考慮し、構築した面を体表面側に 10mm 移動したものを仮想体表面とする。次に、後者の衝突回避経路生成について述べる。③前述した仮想体表面を体外側へ α mm 移動させたものを危険境界面と設定する。事前に決定した術中治療計画の座標系を Σ Plan(原点が位置を、 z 軸が姿勢)とし、その z 軸と危険境界面の交点を接触準備位置とする。④次に初期位置から準備位置に向かうロボットの経路を算出し、その経路上に危険境界面との交点を検索する。⑤交点がある場合、ロボット座標系(Σ Robot)において z 軸方向に $\angle z$ だけ移動させる。そしてまた経路を算出し、交点を検索する。④、⑤の行程を交点が検索されなくなるまで行い、⑥経路を生成する。例えば n 回行われたとすると、図 6 に示したような危険境界面を迂回する経路が算出される。

Fig.4 Flowchart of the collision avoidance control

Fig.5 The way of reconstructed surface

Fig.6 Path generation for collision avoid

4.2 接触制御

続いて図 1(C)で示した体表面からの接触力測定には、図 7 のようにロボットの保持部に取り付けた力センサを用いる。式 (1) は力センサで取得した力・トルク： $F_s(F_{sx}, F_{sy}, F_{sz}, N_{sx}, N_{sy}, N_{sz})$ をニードルガイドの接触面での力・トルク： $F_G(F_{Gx}, F_{Gy}, F_{Gz}, N_{Gx}, N_{Gy}, N_{Gz})$ への変換式を表している。点 P はニードルガイド先端座標系($\Sigma Guide$)の z 軸と力センサ座標系($\Sigma Force$)の z 軸との交点を表している。 l は $\Sigma Force$ の原点と点 P 間の距離を、 n は $\Sigma Guide$ の原点と点 P 間の距離を、 θ は $\Sigma Force$ に対する $\Sigma Guide$ の傾きを示している。接触力の指標に関しては過去の研究より体表面からの反力 1~6N が適度な押し込み力とされており [4], 体表面からの反力は主にニードルガイド接触面の垂直方向の力： F_{Gz} であると考えられるため、 $F_{Gz}=1N$ の時に接触と判断し、ロボットを停止させることにする。

$$F_G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l + n \cos \theta & -n \sin \theta & 1 & 0 & 0 \\ -(n + l \cos \theta) & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ -l \sin \theta & 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} F_s \quad (1)$$

Fig.7 Force on the contact surface of the needle guide

5. 実験

5.1 衝突回避制御実験

本節では、4.1 節で提案した衝突回避制御について行った評価実験について説明する。まず、腹部トラッカーを腹部ファントム(Model057,CIRS)に巻きつけ、体表面形状を取得する。次に、図 8 に示す 6 種類の衝突回避経路を生成させるように初期位置 #1($P_{init\#1}$)～初期位置 #6($P_{init\#6}$)、および治療計画 #1($P_{plan\#1}$)～治療計画 #6($P_{plan\#6}$)を決定する。 $\Sigma Robot$ における初期位置と治療計画の位置を Table 1 に示す。なお、治療計画の姿勢は腹部ファントム表面の法線方向とした。4.1 節で述べた体表面から危険境界面までの距離 a は呼吸による体表面の形状変化を考慮して $a=30mm$ とした。

Fig.8 Experimental system of path planning

Table 1 Initial position and Plan position ($\Sigma Robot$)

	Initial position	Plan position
#1	(150, 50, -50)	(-50, -50, -60)
#2	(150, 0, -50)	(-50, 0, -60)
#3	(150, -50, -50)	(-50, 50, -60)
#4	(-150, 50, -50)	(50, -50, -60)
#5	(-150, 0, -50)	(50, 0, -60)
#6	(-150, -50, -50)	(50, 50, -60)

図 9 に初期位置、および接触準備位置と、生成された衝突回避経路を示す。これは Path2 を示しており、危険境界面を避けるような経路が生成されていることが確認された。そして各経路に基づいてニードルガイドの位置決め精度を検証した。

Table 2 に接触準備位置でのロボットの位置姿勢決め誤差を示す。各軸成分の誤差の要因として、ロボットのキャリブレーション誤差に加え、各アームの自重および機構の歪みにより誤差が生じたと考えられる。また、ロボットが最も仮想体表面に近づいた時の距離を各経路について算出し、評価した。結果を Table 3 に示す。このことから、ロボットが体表面に近づいた時でも 32 mm 程度の余裕があることが確認できた。これは $a=30mm$ と設定した危険境界面に侵入していないことを示している。以上のことから衝突回避制御によって患者への安全が確保できたことが示唆された。

Fig.9 Generated Path#2

Table 2 The errors of preparation position ($n = 6$)

	x	y	z
Position[mm]	1.6 ± 2.3	-2.8 ± 0.8	-0.7 ± 1.2
Angle[deg]	-1.1 ± 0.3	-0.5 ± 1.2	-0.4 ± 0.9

Table 3 The shortest distance between virtual surface and robot path ($n = 6$)

Average[mm]	Standard deviation[mm]
32.3	1.5

5.2 接触制御実験

本節では、4.2 節で提案した接触制御について行った評価実験について説明する。図 10 に今回用いたファントムの外観を示す。水槽上部にベニヤ板と体表面形状を模擬した音響カプラー(AC-4, PTW)を設置した。さらに底面に腫瘍を模擬した直径 20mm のゴム球を設置し、水槽を脱気水で満たした。

次に実験方法を述べる。まず、3D プローブでゴム球の 3D 超音波画像を取得し、ゴム球に沿う様に治療計画を決定した。次に音響カプラーを腹部トラッカーで覆い、表面形状を取得し、衝突回避経路を生成した。接触準備位置まで到達したら、接触制御をしながら、ニードルガイドの穿刺方向に直進させた。この時、ニードルガイドの先端位置および、先端にかかる力を計測した。最後に針金をニードルガイドに通してファントムに穿刺し、その様子を水槽壁面、および超音波画像にて観察した。さらに、 Σ Guide の z 軸と Σ Plan の原点との距離を位置誤差、 Σ Guide の z 軸と Σ Plan の z 軸のなす角を姿勢誤差として計測した。試行回数は 6 回である。

Fig.10 Phantom

図 11 に接触制御の評価結果を示す。グラフは上から時間変化に対するニードルガイド先端の移動量の変化とニードルガイド先端にかかる力の変化を示している。グラフを見ると約 5 s の時に F_z の値が急激に変化し、1N を計測した時に、ニードルガイドの移動量に変化が見られなくなっていることが分かる。これはニードルガイド先端が音響カプラーに接触したことを認識し、ロボットが停止したことを示している。さら

にグラフ上の赤枠領域で平均を算出したところ、1.0N であった。このことから、4.2 節で述べた設定値 $F_z = 1N$ に対して同等の接触力を維持していることが分かる。次に、図 12 に穿刺時の水槽壁面から見た様子、および超音波画像の様子を示す。まず、水槽壁面からみた様子を見ると針金がゴム球に沿って穿刺されていることがわかる。さらに超音波画像からも針金のエコーの様子が確認できた。また、穿刺精度を表 4 に示す。穿刺精度は位置誤差 1.6mm、姿勢誤差 0.6deg であり、ベテランの医者の穿刺精度と言われている 2mm、2deg を上回っていることから、今回提案した穿刺支援システムが有効であることが示唆された。

Fig.11 Variation of parameters of contact control

Fig.12 Procedure of the puncture

Table 4 Puncture accuracy ($n = 6$)

Position error[mm]	Angle error[deg]
1.6 ± 0.7	0.6 ± 0.2

6. 結論

本研究ではパラレルリンクロボットによる超音波ガイド下穿刺支援を目指し、衝突回避制御および接触制御を導入し、評価実験を行った。衝突回避制御実験では、危険境界面を避けるような経路が生成された。さらに、ロボットが最も体表面に近づいた時でも 32mm 程度の余裕があることが確認できた。また、接触制御実験では、接触制御によって接触を判断し、ロボットが停止し、その後接触を維持していることが確認できた。さらに針金が計画通り、ゴム球に沿って穿刺される様子が観察できた。また、穿刺精度は 1.6mm、0.6deg であり、ベテラン医師の穿刺精度と言われる精度を上回ったことから、提案したロボットシステムが穿刺支援に有効であることが示唆された。

文献

- [1] Leanne. M. Sutherland, et al, Arch Surg.,141, 2006
- [2] Y. Kobayashi et al.MRCAS,8, 2012
- [3] H.Qiang, et al. Robotica, 28, 2010
- [4] 高地悠貴 他, 日本ロボット学会誌, 29, 2011
- [5] R.Seipet al. IEEE Trans. on Biomedical Engineering,57, 2010
- [6] S.Onogi et al. ABE,2,2013
- [7] Y.Aoki, et al., J. Robotics and Mechatronics,22 , 2010
- [8] C.Oblonsek et al. Computer Vision And Image Understanding,69,1998