

パラレルリンク型ロボットを用いた超音波ガイド下での 低侵襲治療システムの開発

○入澤佐智恵 小野木真哉 浦山泰寛 榊田晃司
(東京農工大学大学院生物システム応用科学府)

1. 緒言

近年、超音波診断装置を応用した超音波ガイド下低侵襲治療が注目を集めている。例えば超音波ガイド下穿刺や超音波ガイド下手術などが臨床に適用されている。超音波診断装置は他の医用画像診断装置と比較すると、安価かつ小型であり、極めて低侵襲であることから、術中イメージングデバイスとして優れている。

一方、イメージガイド下低侵襲治療としては、高密度焦点式超音波療法(HIFU)^[1]やラジオ波焼灼術(RFA)などがある。HIFUは体外から患部で焦点を結ぶように集束超音波を照射することで、腫瘍等を熱凝固させる手法であり、RFAは、針を経皮的に患部に穿刺し高周波電流を流すことで熱凝固・壊死させる治療法である。他にも研究段階ではあるが超音波と微小気泡を利用した新しい治療システム^[2]では生体外から超音波を照射することにより気泡を体内の目的部位に誘導して治療効率を向上させる方法である。これらの焼灼針や超音波などの治療用デバイスを用いた治療法では、超音波ガイド下において、治療目標とする臓器等の位置関係を把握し、精確に治療用デバイスの位置制御を行うことが不可欠である。

そのため、治療用デバイスの位置決めに対する工学的支援として、様々なシステムが提案されている。例えば本研究室ではインターフェイス上に超音波断面と治療用デバイスであるトランスデューサの音場を可視化するシステムを開発してきた^[3]。これにより焦点と目標物の位置関係を容易に把握できる。しかし人の手でトランスデューサを把持・制御するため手ぶれが生じ、精確な制御が困難である。また治具を用いて撮像用超音波プローブと治療用デバイスを固定させるシステム^[4]もあるが、能動的な治療用デバイスの位置制御が不可能であった。一方、ロボットによる治療用デバイスの位置制御としては、5自由度を持つシリアルリンク型ロボットによる超音波治療^[5]がある。しかしシリアルリンク型ロボットは装置が大型であることから、患者の急な動きや緊急時における安全性という点において問題がある。そこで本研究では軽量かつコンパクトであるパラレルリンク型ロボット^[6-10]を用いた治療用デバイスの位置制御及び超音波プローブへの追従制御を提案してきた。本システムでは滑らかなロボ

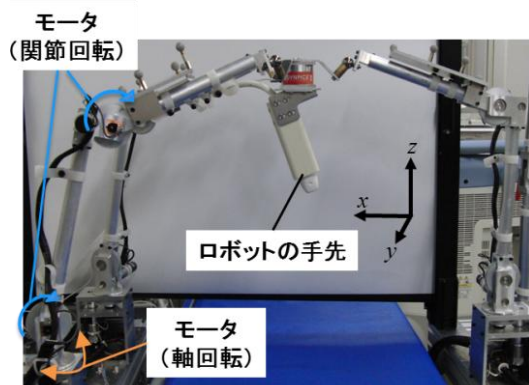
ットの追従制御を目指しており1ms周期を目標としている。しかし、制御周期が十分ではなかったために、追従制御において遅れ及び誤差が生じていた。そこで本研究では、複数のマイクロプロセッサを用いて制御周期を高速化することで、追従速度及び精度向上を行ったので報告する。

2. システム構成

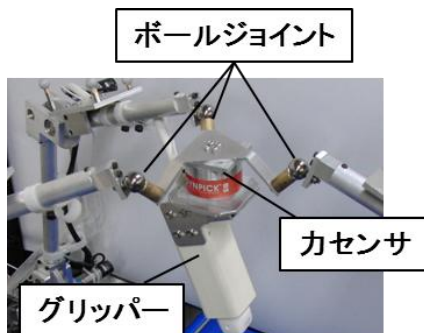
開発したシステムは、1) 治療用デバイスの把持及び位置決めをするパラレルリンク型ロボット、2) ロボットコントローラ、3) 治療用デバイスの位置決め計画ソフトウェア(以後 計画ソフトウェアとする)、4) 光学式三次元位置計測装置(Polaris Spectra, NDI)、5) 模擬超音波プローブで構成される。各構成要素について下記に説明する。

2.1 パラレルリンク型ロボット

図1(a)に本研究で用いる6自由度のパラレルリンク型ロボットの概略図を示す。ロボットは3本のマニピュレータアーム(以後リンクとする)とロボットとロボットの把持物を固定する器具(以後グリッパーとする)から構成される。リンクの先端部に金属でできた球体が付いている。これらは磁石によってグリッパーと接続されており、把持物の x , y , z 軸方向の並進運動、ロール、ピッチ、ヨー(x , y , z 軸回転)の回転運動を実現している。 y 軸上に患者を配置したとき片側に2本、反対側に1本のリンクがそれぞれ来るように配置される。1本のリンクには3個のモータが取り付けられており、それぞれが台座部分の軸回転、2箇所関節回転を行う。従ってロボット全体で9個のモータが使用されている。図1(b)にロボットの先端部分の拡大図を示す。アーム先端にある各金属球体は磁石によってグリッパー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把持物の位置・姿勢に反映されるようになっている。把持物は x , y , z 軸方向の並進運動、ロール、ピッチ、ヨー(x , y , z 軸回転)の回転運動を実現している。また、把持物の上部には6軸力センサ(WDF-6M200-3, ワコーテック)が装備されており、把持物(治療用デバイス)に加わる力・モーメントが検出可能である。



(a) ロボットシステムの全体



(b) ロボットの手先部分

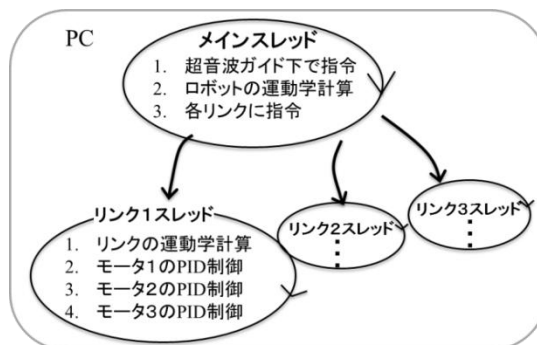
図1 パラレルリンク型ロボットの外観と構造

2.2 ロボットコントローラ

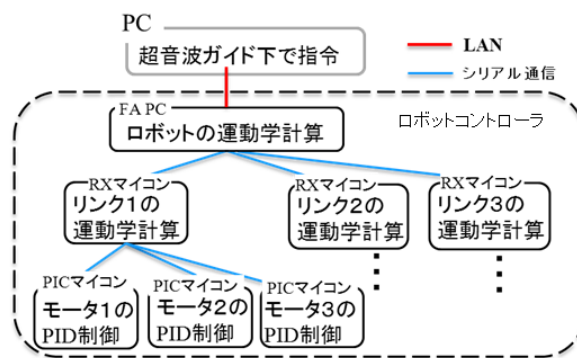
本ロボットの制御周期の高速化を実現するために複数のマイクロプロセッサによる処理の分散を行った。図2(a)に従来のマルチスレッドを用いたロボットの制御プログラムの構成を示す。まず、メインスレッドにてロボットの指令値から運動学の計算により各リンクの指令値を求め、各リンクスレッドへ指令値を与える。次に各リンクスレッドにてリンクの運動学の計算より各モータの指令値を求め、各モータへ順々にPID制御を行う。これによりロボットが指令位置へと制御される。しかしながらこの制御法では各運動学の計算、モータのPID制御、計画ソフトウェアで用いる画像処理の全てを1台のPCで行っていたため計算時間が膨大になっていた。そのため、ロボット全体の制御周期が追従制御には十分ではなかった。

次に、提案手法である複数のマイクロプロセッサによる処理の分散したコントローラの構成を図2(b)に示す。コントローラは追従制御及びロボットの運動学計算のための組み込み用コンピュータ (BX300, Contec, 以後 FAPC とする), 各リンク制御用マイクロプロセッサ (RX621, Renesas, 以後 RX マイコンとする), 各モータ制御用マイクロプロセッサ (PIC24H, Microchip, 以後 PIC マイコンとする) で構成される。ロボットの制御は以下の4つのステップにより行われる。

- i. PC で計画ソフトウェアによりロボットへの指令値を決定し、FAPC に送信
- ii. FAPC にてロボットの運動学計算を行い各リンクへの指令値を求め、RX マイコンへ送信
- iii. RX マイコンにてリンクの運動学計算を行い各モータの指令値を求め、PIC マイコンへ送信
- iv. 各 PIC マイコンにて各モータの PID 制御



(a) マルチスレッドを用いたコントローラ



(b) マイクロプロセッサによるコントローラ

図2 各制御プログラムの構成

2.3 追従制御

次に、断層像上の目標に対する追従制御について説明する。図3に追従制御のシステム全体、図4にブロック図を示す。ロボットの各リンク及びプローブに、複数の赤外線反射球で構成されるトラッカーを取り付け、各リンク先端の位置及びプローブの位置・姿勢を位置計測センサで計測可能とした。なお、位置計測装置で計測した超音波プローブトラッカーの位置・姿勢と断層像の位置関係については超音波キャリブレーション^[11]により同定した。

超音波プローブから撮像した超音波断層像上にて治療用デバイスの目標位置・姿勢を設定するための計画ソフトウェアを構築した(図5)。この目標位置・姿勢にプローブキャリブレーション行列を用いてプローブトラッカー座標系に変換し、ロボットコントローラに送信する。ロボットコントローラには、位置計測装置が接続されており、これで計測したロボ

ットトラッカーとプローブトラッカーの位置関係を用いて、計画ソフトウェアから受信した目標位置・姿勢をロボット座標系に変換する。最後にロボット座標系における目標位置・姿勢から、逆運動学を解いてロボットを駆動する。以上より、準リアルタイムなプローブ位置に追従したロボット手先の追従制御が可能である。

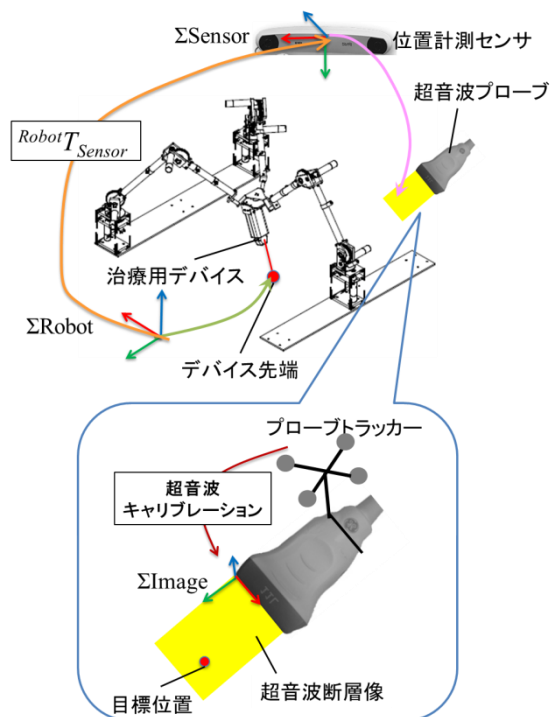


図3 超音波プローブへの追従制御

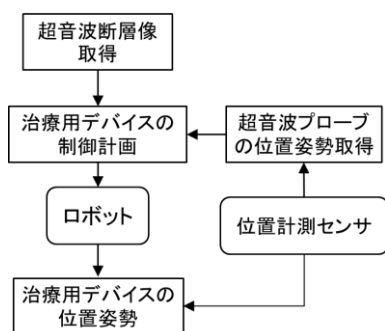


図4 追従制御のブロック図

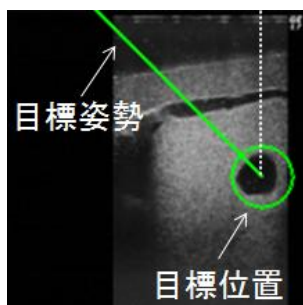


図5 治療用デバイスの位置決め計画ソフトウェア

3 評価実験とその結果

3.1 ロボットの制御周期の評価

従来のマルチスレッドを用いた制御周期と今回開発したロボットコントローラによる制御周期のマイクロプロセッサの制御周期の比較を行った。制御周期はロボットの指令値を与えた時からリンクの関節角度を算出するまでの周期及びモータ位置制御周期を、DA変換ポートを用いてオシロスコープで計測した。

従来手法では指令値から関節角度を算出するまでの時間は $50\mu\text{s}$ であり、モータ位置制御周期は $160\mu\text{s}$ であった。一方提案手法では指令値から関節角度を算出するまでの時間は $300\mu\text{s}$ であり、モータ位置制御周期は $1.6\mu\text{s}$ であった。

3.2 ロボットの位置決め精度評価

ロボットのマイコンソフトウェア実装を行い制御周期の高速化が実現したロボットの位置決め精度評価を行った。まずリンクの先端(球体)に無作為に指令値を与え、位置計測センサによる測定値との平均誤差($n=100$)を求めた。3本のリンクの平均RMS誤差は 1.26mm であった。

次にロボットの位置決め誤差を検証した。ロボットの先端にロボット座標系において x 軸並進に $-50\sim 100\text{mm}$, y 軸並進に $-50\sim 50\text{mm}$, z 軸並進に $-30\sim 30\text{mm}$ と 1mm 刻みに指令を与えた。また回転運動についても各 x,y,z 軸に $-20\sim 20\text{deg}$ と 1deg 刻みの原点位置での回転運動を与えた。各軸並進運動時のロボットの先端の位置誤差と姿勢誤差を表1に、各軸回転運動時の位置・姿勢誤差を表2に示す。位置・姿勢誤差ともに x 軸並進運動時に最も大きくなった。

表1 各並進運動の位置及び姿勢誤差

	x 軸並進 ($n=151$)	y 軸並進 ($n=101$)	z 軸並進 ($n=61$)
位置誤差 [mm]	3.22 ± 0.86	2.55 ± 0.23	1.44 ± 0.35
姿勢誤差 [deg]	1.78 ± 0.51	0.93 ± 0.14	0.64 ± 0.14

表2 各回転運動の位置及び姿勢誤差

	x 軸回転 ($n=41$)	y 軸回転 ($n=41$)	z 軸回転 ($n=41$)
位置誤差 [mm]	1.28 ± 0.56	1.42 ± 0.28	0.80 ± 0.23
姿勢誤差 [deg]	0.85 ± 1.11	1.64 ± 0.17	1.37 ± 0.15

3.3 ロボットの追従制御の評価

最後にロボットの追従制御実験を行った。超音波プローブで撮像される断層像上の任意の点をロボットの先端への指令値とし、プローブを手動でx,y,z軸並進運動をしてロボットのプローブに対する追従制御精度を評価した。プローブとロボットの位置・姿勢は位置計測センサにより計測した。

時間軸上でのロボット座標系におけるロボットの先端への指令値と実測値の変位を図6に、位置・姿勢の平均誤差と標準偏差を表3に示す。

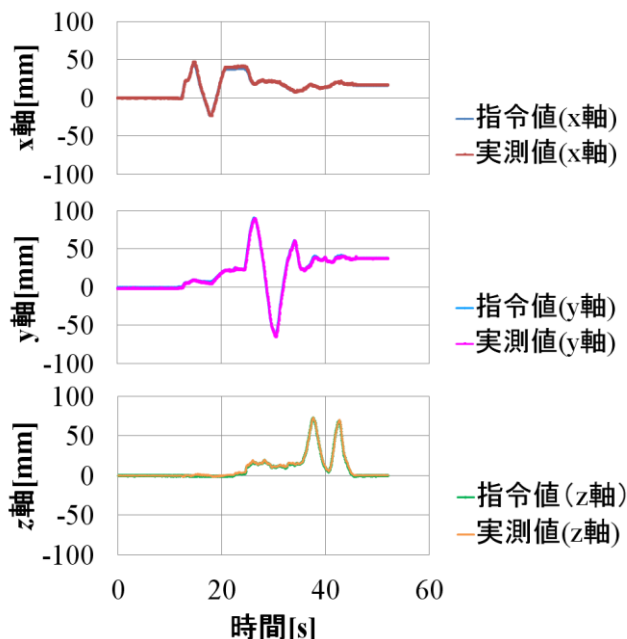


図6 追従制御時の各軸成分の変位の様子

表3 追従制御での位置及び姿勢誤差

位置誤差[mm]	姿勢誤差[deg]
2.24±1.39	0.76±0.50

4 考察

本研究では超音波ガイド下での治療用デバイスの位置決めシステムを提案し、ロボットコントローラの改良による追従制御精度の向上を行った。従来のシステムと比較すると、指令値から関節角度を算出するまでの時間は $50\mu\text{s}$ から $300\mu\text{s}$ と各マイクロプロセッサの通信時間により長くなったが、モータ位置制御周期は $160\mu\text{s}$ から $1.6\mu\text{s}$ と100分の1の時間となった。このことから1msの間にモータ制御を5回から440回行うことが出来た。追従制御においては、位置誤差は $12.4\pm 5.23\text{mm}^{[6-8]}$ から $2.24\pm 1.39\text{mm}$ に、姿勢誤差は $1.45\pm 1.57\text{deg}$ から $0.76\pm 0.50\text{deg}$ に、時間遅れは100msから50ms以下に向上した。よって滑らかなロボットの位置制御が可能となったといえる。

次にロボットの位置決め精度評価の誤差の原因として位置計測センサのトラッキング誤差(0.25mm)、

ロボットの初期位置の誤差、ロボットの機構的な歪みが考えられる。ロボットのx軸並進運動が最も誤差が大きくなった理由としては制御範囲を他の運動と比べ大きかったためと考えられる。またロボットの初期位置決めをロボット座標系の原点で行ったため、原点から離れた場所では機構的な歪みにより誤差が大きくなったと考えられる。

最後に臨床への有用性を考える。治療用デバイスに治療用トランスデューサを考える。位置決め精度において原点付近での制御では位置誤差が1mm程度であることから、音軸に対する半値幅が1mmのトランスデューサであれば対象に音波を照射可能である。一方、音波を効率良く体内に照射させるためにはトランスデューサを体表面に接触させる必要がある。本ロボットには力センサが装備されており、人体に接触しているか否かを判断することができ、かつ人体に押し込むことを防げる。これを用いることでトランスデューサを体表面に接触させることができる。以上より臨床への適用が可能であると言える。

5 まとめ

パラレルリンク型ロボットによる超音波ガイド下での治療用デバイスの位置制御システムを提案した。精度向上のためにマイクロプロセッサを用いたコントローラを開発し制御周期の高速化を行った。結果から1msec周期でのロボットの位置制御が可能であり、追従制御における誤差は 2.24mm 、 0.76deg であった。以上より、本システムは追従制御に十分な制御周期かつ精度であり、超音波ガイド下治療への適用可能性が示唆された。

6 謝辞

本研究は、日本学術振興会の最先端・次世代研究開発支援プログラムによるものであることを記し、ここに感謝致します。

参考文献

- [1] GJ. Liu ,et al. Ultrason Med Biol, Vol 36, No.1:pp.78-85, 2010
- [2] 渡會ほか, 超音波医学, Vol.38, No.4, pp.433-445, 2011
- [3] 田口ほか, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J95-A, No.6, pp.467-480, 2012S. Adam, et al. Circulation. 100:203-208, 1999
- [4] H.Qiang, et al. Robotica,28: 209-214, 2010
- [5] 入澤ほか,第51回日本生体医工学会大会プログラム・論文集,2012
- [6] 入澤ほか, 第51回日本生体医工学会大会プログラム・論文集, CD-ROM, 2012
- [7] 入澤ほか, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, CD-ROM, 2012
- [8] S.Irisawa et al. Proc. of 34th IEEE EMBS, 2012 (accepted)
- [9] 高地ほか, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.7, pp.634-642, 2011
- [10] 浦山ほか, 第29回日本ロボット学会学術講演会論文集年, CD-ROM, 2011
- [11] 菅野ほか, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, CD-ROM, 2012