

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

頸部血流計測用ロボットシステム  
に関する研究

Study on a Robotic Carotid Blood Flow  
Measurement System

申請者

中楯	龍
Ryu	NAKADATE

生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

2012年 2月

本論文は、医用超音波診断の一つである **Wave Intensity** 計測の計測精度を向上させ、計測に要する時間を短縮することを目的として、ロボットによる計測自動化の提案と、その有効性の検証について論じている。

近年、ロボティクスの実社会での活用、とりわけこれまで実用化例の少なかったサービス分野での実用化に関する研究が盛んになされており、その中でも医療分野での活用に関する研究は重要視されている。

本論文が対象とする医用超音波診断はロボティクスの観点から見て極めて有意義な対象である。超音波診断は他の医用画像検査様式と比較し、リアルタイム画像が得られるため、ロボット制御に画像情報を利用できる余地が多い。また、超音波診断にはプローブと呼ばれる超音波送受信機を検査技師が手に持って操作する必要があることに起因するデメリットが複数存在し、それらはロボットにプローブを把持させることに加え、プローブ操作を自動化することが効果的な解決手段となりうる。例えば、検査部位の再現性はロボットが自動的に検査部位を決定すれば向上が期待される。また、ロボットが人に代わってプローブの操作を行うことで、検査技師の身体的負担を軽減することが期待される。さらに、プローブ操作の熟練が必要な検査においては、熟練技術のロボットへの移植が有効と考えられ、また遠隔診断においては操作性の劣化を克服する手段として自動化が考えられる。

このように、ロボットによる超音波診断の自動化は社会的な意義が高いとともに、発展性の高い研究分野である。しかしながら、ロボットで超音波診断を行う先行研究は遠隔診断に関するものが多く、画像を認識しながら検査部位を能動的に探しに行く手法を開発し生体に適用した例はこれまでに無い。従って、本論文で論じられる超音波検査のロボットによる自動化は、医療ロボットの研究において新たな方向性を提案するものと言える。

超音波診断の様々な検査様式の中で、本論文では頸動脈における **Wave Intensity** の計測を対象としている。**Wave Intensity** は動脈硬化などの循環器系疾患を早期に発見することが期待されている指標であり、超音波診断装置で頸動脈の径と血流速の連続データを約 10 秒程度計測し、それぞれの時間微分の積を取ることで算出される。この計測には非常に狭い計測点へプローブを一定時間当て続ける必要があり、検査者の手や患者の動き、さらに拍動による血管の動きが計測精度を低下させる。本論文では、この問題を解決するため、プローブの位置決めをロボットで自動化することを提案している。さらに、**Wave Intensity** 計測誤差の発生要因を網羅的に検討し、その結果得られた知見に基づき、ロボットに必要な機能を実装するというアプローチを取っている。

プローブ位置決めの自動化には超音波画像中の臓器認識が不可欠であるが、超音波画像は不鮮明でノイズが多く含まれるため、一般的な画像処理の技術をそのまま適用することが難しいことが知られている。申請者は、対象臓器である血管の解剖学的な特徴に基づく画像認識アルゴリズムを構築し、リア

ルタイムで頸動脈およびその内膜組織を検出することに成功し、それらを用いてロボットによる頸動脈上へのプローブの自動位置決めを実現した。さらに2次元断面である超音波画像情報を用いた3次元方向への追従アルゴリズムを提案し、世界で初めて生体への適用可能性を示した。これらの要素技術は、本研究の目的以外にも様々な応用が期待されるものである。

本論文は、以下に示す7章から構成されている。各章の要約を示す。

第1章では、本研究の背景、目的について述べられている。医療ロボットの先行研究例をロボットの自律性と人間の能力に対する付加能力の2軸で分類することを試み、その中での本研究の位置づけと意義が示されている。

第2章では、Wave Intensityの定義やその計測手法の詳細の説明がなされ、その計測の問題点が、計測誤差発生による再現性低下と、計測時間の長大化であることに言及している。それらの原因を明らかにするために、血管を円筒と仮定した幾何学モデルにより、各種誤差要因がWave Intensity計測値に与える理論的誤差を求め、実験によりそのモデルを検証している。これにより、Wave Intensity計測誤差、計測時間長大化の要因を網羅的に分析し明らかにし、それらを改善するためのロボットの要求仕様が示された。

第3章では、本研究で使用するロボットWTA-2Rのハードウェアについて述べられている。本ロボットは超音波診断装置のプローブを把持して微小な位置決めを行うことを目的に開発された。エンドエフェクタにおける剛性、動作精度を確保するため、マニピュレータ部は能動6自由度を直動パラレルリンク機構で構成していることが特徴的であり、その最適化設計に遺伝的アルゴリズムを適用する手法について提案されている。自動化の有用性を比較検証できるよう、MEMSセンサを用いた6自由度の入力が可能な遠隔操作のコントローラの設計について述べられている。その他、内製のモータドライバ、力センサ等の各要素の設計について触れられ、さらに医療ロボットにおいて特に重要な安全対策についても詳細な検討がなされている。本ロボットを用いた位置決め精度実験において、0.06[mm]の精度が達成された。

第4章では本ロボットによるプローブ位置決めの自動化について述べている。Wave Intensityの計測点は超音波画像中の複数の特徴を用いて確認されるため、それら各々の特徴に応じた個別の画像認識アルゴリズムが必要とされる。具体的には頸動脈長軸断面、内膜、頸動脈の角度等の画像認識アルゴリズムが開発され、それらを用いたプローブ軌道設計について記されている。サンプル画像51枚に対し、頸動脈の認識率は前壁93%、後壁100%、内膜長さの自動認識と目視計測の相関係数は前壁で89%、後壁で93%を達成した。

第5章では、画像情報を用いた患者の動きへの追従アルゴリズムの開発について述べている。超音波画像の法線方向への追従動作を実現するために、追従直前にロボットで頸部をスキャンすることで取得した3D画像データ内で現画像のマッチングを行うことで現在位置を推定する手法を提案し、その有効性とWI計測への適用の限界について実験結果を交えて説明している。

第 6 章では、本ロボットシステムの評価試験について述べられている。被験者 15 名に対し、Wave Intensity 計測を、熟練技師および非熟練技師がフリーハンド、ロボット（遠隔操作モード）、ロボット（自動位置決めモード）のそれぞれで行い、計測誤差、所要時間の比較検討がなされた。その結果、熟練技師ではロボットによる計測誤差、所要時間の良化は限定的である一方、非熟練技師では自動位置決めモードを使用した時に特に顕著にロボットによる計測誤差、所要時間の良化が見られ、熟練技師のフリーハンドと同程度の計測誤差、所要時間が達成された。これらにより、本論文で提案するロボットの自律化の有用性が示された。

第 7 章では以上の研究成果の総括と本研究の発展性について言及している。以上要するに、本論文は、これまで殆ど行われてこなかった医療ロボットの自律化に着目し、これを医用超音波診断の一つである Wave Intensity の計測を題材として実現し、生体での実証試験によりその有用性を確認することを目的に書かれており、その成果として、画像処理技術を用いた臓器認識アルゴリズムと、パラレルリンク機構を採用したマニピュレータの開発に成功し、それらを統合したロボット計測の自動化を実現した。実証試験の結果、自動化されたロボットを用いることにより、非熟練者が熟練者に近い計測を行える可能性が示されたことを報告している。

本研究の成果は、Wave Intensity を計測する自動ロボットの実現を通じて、医療ロボットの自動化という新しい研究分野を提案、開拓したことにある。加えて、本研究で開発された個別の技術には他の用途に応用できるものが多い。具体的には、内膜検出アルゴリズムは一般の頸動脈検査である内膜中膜複合体厚の測定への応用、追従アルゴリズムは集束超音波における呼吸性移動補償への応用などが可能であり、様々な方面への発展が期待される。よって、ロボット工学、機械工学のみならず、画像処理工学、医用機械工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2012 年 2 月

審査委員

(主査)	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	高西淳夫
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	梅津光生
		医学博士（東京女子医科大学）	
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	藤江正克
	東京女子医科大学名誉教授・姫路獨協大学名誉教授		
		工学博士（東京大学）	菅原基晃
	東京都市大学教授	医学博士（東京女子医科大学）	仁木清美
	東京女子医科大学教授・早稲田大学客員教授		
		医学博士（東京女子医科大学）	伊関洋