

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文概要

## 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

2011年11月

本論文では、医用超音波診断の一つである **Wave Intensity** の計測精度を向上させ、計測に要する時間を短縮するためのロボットシステムの構築について論じた。

超音波診断は、他の医用画像検査様式と比べ、低浸襲、低コストによる簡便さのメリットがある一方、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ち、検査部位にピンポイントで当てる必要があることに起因するデメリットが存在する。これらのデメリットは、以下のように、ロボットにプローブを把持させることに加えて、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。

第一に、検査部位の決定が検査者に委ねられているため、再現性を保証する手段が無い。ロボットが自動的に検査部位を決定すれば計測再現性の向上が期待される。第二に、1日に多数の患者を診断する超音波検査は検査技師の身体的負担を強いるものであるが、ロボットが人に代わってプローブの操作を行うことで、この負担を軽減することが期待される。第三に、一部の超音波診断手法では数十秒から数分間、同一断面を観察する手技が求められるが、プローブを持つ検査者の手や患者の動きにより観察位置がずれてしまうことがある。ロボットがこのずれを自動的に補正する機能を持たせることにより改善が見込まれる。第四に、所望の画像を得るためには熟練したプローブ操作技術が必要であり、非熟練者による検査は計測精度の低下と計測時間の長大化を招くが、熟練者の技術をロボットの動作に移植することで、非熟練者でも熟練者と同様の検査ができることが期待される。第五に、無医村など熟練技師の不在地域において診療サービスを提供するために、ロボットにプローブを把持させたマスタスレーブ式の遠隔診断の研究が、過去多数行われているが、そこでは通信遅延などによる操作感の劣化を克服することが主な課題とされている。その解決手段として、遠隔操縦による診断の一部または全部を自動化することは有効であると考えられる。

このように、ロボットによる超音波診断の自動化には様々なメリットがある。しかしながら、ロボットで超音波診断を行う研究は、前述のマスタスレーブ式のロボットでの遠隔診断を目的とするものが多く、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。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く、生体組織の認識が困難であることがその理由として挙げられる。本研究では、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より、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。

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 の計測を対象とする。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。これにより、心臓と血管を一つのシステムとして分析ができる様々な指標が得られる。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。それゆえ検査者には集中力が要求され、計測時間も長い。また、身体的、精神的な負担が多い。また、超音波診断装置上での設定項目が多く、非熟練者がプローブの位置決め集中すると設定ミスが発生し易い。また、現在 Wave Intensity 計測の熟練者数は限定的である。このように、Wave Intensity 計測にはロボットによるプローブ把持とその自動化が有効な前述の 5 点がそのまま当てはまる。

本研究の目的は、Wave Intensity の計測精度を改善し、検査者負担を軽減するためのシステムを構築することである。まず Wave Intensity 計測誤差の発生要因を網羅的に検討した。血管を円筒と仮定し、プローブの位置、角度等のずれ量、血管の心拍に伴う各方向への移動速度等、考えうる誤差要因を全てリストアップし、それらが Wave Intensity の計測誤差に与える影響度を幾何学的なモデリングにより定量的に明らかにし、予備実験にてそのモデルを追認した。

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した。具体的には、超音波ビームと頸動脈のなす角度、および頸動脈上の計測点が計測再現性に影響することから、計測点までプローブを自動誘導する機能を開発した。血管が深い位置にある患者の場合は計測ノイズが増大することからプローブで圧迫を加えるという熟練者の手技をロボットにも実装した。プローブを計測点に誘導後、患者の動きにより血管壁の輝度が失われてしまうことが計測誤差につながることから、患者が動いても、最適な計測点にプローブを自動的に復帰させる機能を開発した。これら機能の有効性を評価試験で示した。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景、目的について述べた。医療ロボットの先行研究例を挙げ、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を示した。

第 2 章では、Wave Intensity の定義やその計測手法の詳細を説明し、その計測の問題点について述べた。前述のとおり、Wave Intensity 計測の問題点は、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。それらの原因を明らかにするために、血管円筒モデルにより、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た。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を示した。

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た。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され、その最適化設計には遺伝的アルゴリズムが用いられた。本研究の目的はこのロボットを自動制御で動作させることであるが、例外に対応できるように、MEMS センサを用いた 6 自由度の入力が可能なコントローラを装備し、遠隔操作方式の操作を可能とした。内製のモータドライバ、力センサについて触れ、医療ロボットにおいて特に重要な安全対策についても記した。本ロボットを用いた位置決め精度実験において、0.06[mm]の精度を達成した。

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た。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、それらの特徴に応じた個別の画像認識アルゴリズムが必要である。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を開発した。また、計測点を探すためのプローブ軌道を設計した。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計数は前壁で 89%、後壁で 93%を達成した。

第 5 章では、患者の動きに追従するアルゴリズムの開発について述べた。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、実験によりその有効性と WI 計測への適用の限界を示した。

第 6 章では、本ロボットシステムの評価試験を行った。15 名の被験者に対する 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、所要時間を比較した。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 章では結論として以上の研究成果を総括すると共に、本研究の発展性について言及した。

以上より、本ロボットシステムが Wave Intensity の計測精度向上および計測時間短縮に有用であることを示した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中楯 龍 印

(2011年10月 現在)

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月	連 名 者 ( 申 請 者 含 む )
1. 論文				
○	頸部血流計測ロボットシステムの開発 — 画像情報を用いた超音波プローブの自動位置決め・追従 —	日本ロボット学会誌 Vol. 29, No. 7, pp. 626-633	2011 年 9 月	<u>中楯 龍</u> Jorge Solis 小川 宏治 菅原 基晃 仁木 清美 高西 淳夫
○	Development of a Robotic-Assisted Carotid Blood Flow Measurement System	Mechanism and Machine Theory, Vol. 46, No. 8, pp. 1066- 1083	2011 年 5 月	<u>中楯 龍</u> 松永 宣樹 Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
○	Out-of-Plane Visual Servoing Method for Tracking the Carotid Artery with a Robot-Assisted Ultrasound Diagnostic System	Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011), pp. 5267-5272	2011 年 5 月	<u>中楯 龍</u> Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
	Implementation of an Automatic Scanning and Detection Algorithm for the Carotid Artery by an Assisted-Robotic Measurement System	Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp. 313-318	2010 年 10 月	<u>中楯 龍</u> Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美 斎藤 明子
	Development of the Ultrasound Probe Holding Robot WTA-IRII and Implementation of an Automated Scanning Method based on Ultrasound Image Feedback	Proceedings of the 18th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (RoManSy2010), pp. 359-366	2010 年 7 月	<u>中楯 龍</u> Jorge Solis 高西 淳夫 菅原 基晃 仁木 清美 皆川 栄一

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者（申請者含む）
論文の続き	Workspace analysis and design improvement of a carotid flow measurement system	Proceedings of Part H: Journal of Engineering in Medicine, vol. 224, no. 11, pp. 1311-1323	2010 年 4 月	Giuseppe Carbone <u>中橋 龍</u> Jorge Solis Marco Ceccarelli 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
	Development of Assisted-Robotic System Designed to Measure the Wave Intensity with an Ultrasonic Diagnostic Device	Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), pp. 510-515	2009 年 10 月	<u>中橋 龍</u> 宇田寿人 平野博晃 Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
	Development of a Robotic Carotid Blood Measurement WTA-1RII:Mechanical Improvement of Gravity Compensation Mechanism and Optimal Link Position of the Parallel Manipulator based on GA  (その他 1 件)	Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2009), pp. 717-722	2009 年 7 月	<u>中橋 龍</u> 宇田寿人 平野博晃 Jorge Solis, 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
2. 講演	頸部血流計測ロボットシステム WTA-2R の開発 - 臨床応用のための安全設計 -	第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3C1-8	2011 年 9 月	<u>中橋 龍</u> 高西 淳夫 小川 宏治 菅原 基晃 仁木 清美
	3D プリンタと光センサを用いた小型 2 軸力覚センサの開発  (その他 7 件)	第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L2-1	2011 年 9 月	<u>中橋 龍</u> 高西 淳夫 小川 宏治 菅原 基晃 仁木 清美

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者（申請者含む）
3.その他 (賞)	Finalist for Best Student Paper Award	IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2009)	2009 年 7 月	<u>中楯 龍</u> 宇田 寿人 平野 博晃 Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美
(特許)	超音波診断システム，超音波診断装置用ロボット，及びプログラム  (その他 2 件)	特願 2010-198404	2010 年 9 月	高西 淳夫 <u>中楯 龍</u> 大信田 克哉 松永 宜樹 原田 裂光 小川 宏治
(著書)	ロボット工学テキスト 第 1 章 8 節 ” 超音波診断装置補助ロボットシステム WTA-2”，第 7 章 ” シミュレーション” 担当	株式会社 JAPANROBOTECH	2011 年 1 月	早稲田大学 高西 淳夫研究室，計 15 名
(論文)	Development of Robot Assisted Measurement System for Abdominal Ultrasound Diagnosis  (その他 4 件)	Proceedings of the 3rd IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob 2010), pp. 367-372	2010 年 9 月	<u>中楯 龍</u> 徳永 泰明 Jorge Solis 高西 淳夫 皆川 栄一 菅原 基晃 仁木 清美 斎藤 明子
(講演)	超音波診断装置による肝臓領域の自動走査制御系の構築の試み  (その他 4 件)	第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，3C1-7	2011 年 9 月	石井 隆史 <u>中楯 龍</u> 小川 宏治 斎藤 明子 菅原 基晃 仁木 清美 高西 淳夫