

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05324

研究課題名（和文）小型超音波ロボットと多重時空間スケール解析による在宅での生活習慣病評価システム

研究課題名（英文）Development of small ultrasound robot and multiple spatiotemporal scale analysis for lifestyle-related disease evaluation at home

研究代表者

小谷 潔 (KIYOSHI, KOTANI)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：00372409

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 15,500,000円

研究成果の概要（和文）：在宅での使用に向けて組み立て分解可能な超音波ロボットを設計・製作した。製作したロボットは設置や収納が簡便にでき、プローブ先端は6自由度の駆動が可能である。また、リンク長さを変更することで、計測部位に応じたワークスペースが確保できる。次に、提案ロボットの校正を行うためにファントムを製作し、製作ファントムを用いた校正の有効性を確認した。また、血管探索において、プローブをT字形状に配置し直進移動と回転を組み合わせた探索手法を提案し、その有効性を確認した。さらに、上腕動脈の駆血・解除と連動した血流評価法を提案し、駆血・解除を取り入れた計測によって血管硬さの評価がより適切に行える可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では在宅での使用を想定し、組み立て分解可能という新しい特徴を持った超音波診断ロボットの開発に取り組んだ。本研究においては装置の設計、製作に加えて校正、血管評価までを行い、一定の成果を挙げることができたと考えている。このような研究を発展させ、将来的には生活習慣病を生活の現場で評価し改善していく技術に成熟すると社会的な意義が大きいと考えている。

研究成果の概要（英文）：We designed and constructed an ultrasound robot that can be assembled and disassembled for home use. The tip of the probe can be driven with six degrees of freedom. Also, by changing the link length, an appropriate work space according to the measurement site can be obtained. Next, the calibration method using original phantom was proposed, and the effectiveness of the method was confirmed. In addition, for vessel search, we proposed a search method that combines linear movement and rotation with arranging probes in a T shape, and its effectiveness was confirmed. Furthermore, we proposed a method of blood flow evaluation that associated with brachial artery avascularization and release, and showed the possibility that the vascular stiffness can be appropriately evaluated by the proposed method.

研究分野：生体医工学

キーワード：超音波検査ロボット 生活習慣病 自動検査

1. 研究開始当初の背景

生活習慣病は動脈硬化や高血圧といった症状を介して心疾患や脳血管疾患の一因となる。これらの疾患は現在の日本人の死因において大きな割合を占めているため、予防技術の確立は超高齢社会を迎える日本にとって急務といえる。このような疾患の予防には生活環境下での長期データ取得・解析に基づく生活習慣改善が必須である。

これまでの生体長期データの研究では現状の測定装置で取得可能なデータの解析にとどまっている。今後の支援の効率を上げヘルスケアに貢献するには、これまで在宅では取得できなかった内部の局所状態を長期取得する技術を発展させ、さらに非侵襲的には計測できない部位については数理モデルを用いた解析技術によって局所血流変化や制御異常を評価する研究が重要であると着想するに至った。

生体計測技術の中で、超音波診断は非侵襲かつ MRI (Magnetic Resonance Imaging : 磁気共鳴画像法) 等よりも簡便に体内の血流・組織の評価が可能な技術である。そのため超音波診断が在宅で簡便に行えるようになれば、効果の判定が曖昧であった生活習慣病に対する投薬、運動療法の局所的影響を日ごとに評価することができ、予防医学・在宅医療を推進させることが可能となる。しかしながら、既存の超音波診断支援の研究は病院での診断支援を目的としているため、非常に大型の装置であり、また簡便に校正する手法がないために組立ごとに位置決め精度が低下してしまう。

そこで在宅で簡便に使用可能な自動超音波診断ロボットを開発し、かつ取得した循環器の活動を評価す数理解析技術と組み合わせることで、ハードおよびソフト両面から生活習慣病の経過観察や予防を効果的に行うシステムの開発が必要とされている。

2. 研究の目的

超音波診断は非侵襲かつ簡便に体内の血流・組織の状態を知ることができるため、生活習慣病に起因する血管や内臓脂肪の状態検査に必要とされている。しかしながら、現状の超音波診断装置は大型かつ適切な自動校正・自動測定手法がなく、在宅での診断に応用することができない。本研究では、組立・分解可能かつ、簡便に複数の検査項目を自動測定可能な超音波診断システムを開発する。さらに数理解析によって、在宅での生活習慣病の実態評価を行う。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 装置設計・製作と運動学解の導出、(2) 校正用ファントムの製作および校正アルゴリズムの評価、(3) 自動探索・計測システムの構築、(4) 計測結果の数理解析手法の提案と評価、の段階を経て研究を遂行する。

4. 研究成果

研究の方法の項で述べた (1) から (4) のそれぞれの項目について、具体的な研究内容を以下に内容をまとめる。

(1) 装置設計・製作と運動学解の導出

組み立て分解可能な超音波ロボットを設計・製作した。製作した超音波ロボット駆動機構は球面磁気軸受を用いており、設置や収納が簡便にできるシステムとなっている。また、ロボットはパラレルリンク機構を有し、そのプローブ先端は 6 自由度の駆動が可能である。さらに、本ロボットはリンク長さを変更することで、計測したい部位に応じたワークスペースが確保できる。

製作にあたって必要な設計パラメータの関係を図 1A に示す。本研究では目的部位に対してワークスペースに関する要求仕様を与え、遺伝的アルゴリズムを用いて適切なパラメータを算出し設計に用いた。その後、得られた設計パラメータを用いて実際にロボットを製作した。製作したのは、分解収納時の省スペースに特徴のある 2 次元ラックピニオン式および移動誤差が少なく精度の検証に適したステージ式の 2 つである。2 次元ラックピニオン式ロボットの概観図と収納時の様子を図 1B-1、B-2 にそれぞれ示す。また、ステージ式ロボットの概観図は図 1-C に示す通りである。さらに、両者に共通するプローブ保持部分の拡大図を図 1D に示す。プローブは最大 2 本設置可能であり、直交する 2 つのプローブ情報を用いて適切な部位の探索を行うことができる。次に、製作したロボットの機構について、トレイ位置からプローブの位置・姿勢を評価するための順運動学、プローブの位置・姿勢からトレイ位置を算出するための逆運動学を解析し計算機上に実装した。これらの計算によって、ロボットの各アクチュエータと超音波プローブ先端の位置関係を適切に対応づけられることが確認された。

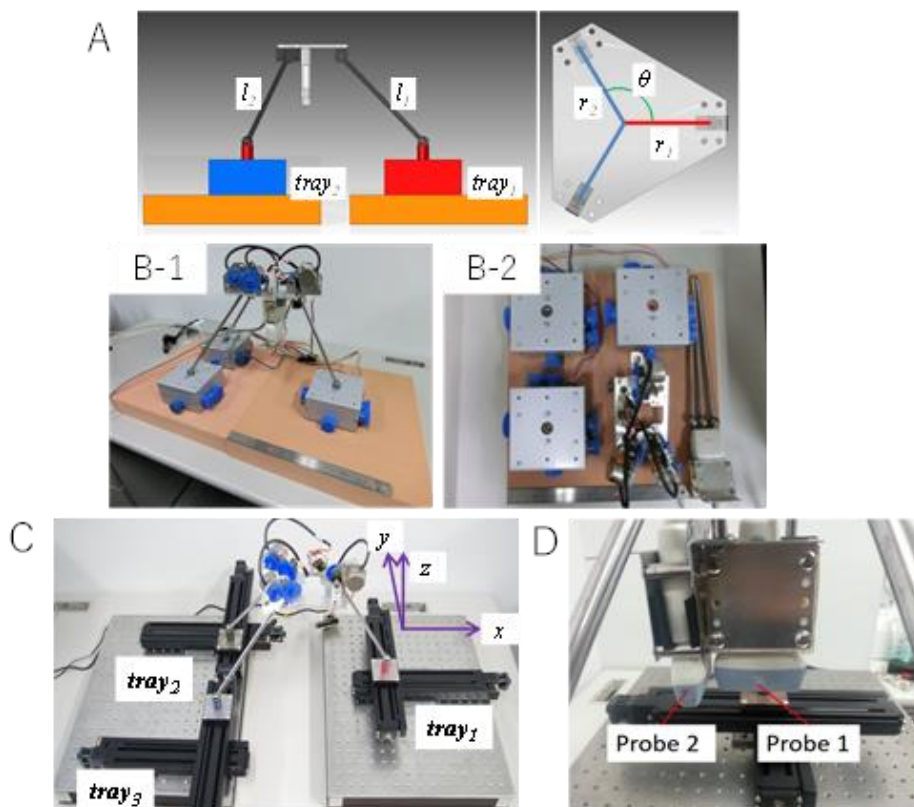


図 1 (A) 超音波ロボット製作に必要な設計パラメータ, (B) 2次元ラックピニオン式超音波検査ロボット. 概観図が B-1 であり, 分解後の様子が B-2. (C) ステージ式超音波検査ロボットの概観図. (D)プローブ保持部の拡大図

(2) 校正用ファントムの製作および校正アルゴリズムの評価

本研究は最終的には在宅で使用者が組み立てて使用することを想定しているため, 組立のばらつきによる誤差を評価した上でキャンセルしなければならない. そのためには組み立てごとに校正を行う必要があり, 簡便さと精度の高さを兼ね備えた手法を提案する必要がある. 複数のワイヤが張り巡らされた市販のファントムを使用することも考えられるが, 市販のファントムでは樹脂が使用されているために, ファントムの計測を行いながらプローブ高さ方法に移動することができないため, 本研究での校正の目的には適していないと判断した.

そこで, はじめに計測物を用いない校正手法として, 各トレイの駆動時の姿勢変化を用いる手法を提案した. この手法では, 3つのトレイそれぞれに決まった動作を課し, それに伴う天板の姿勢と天板と各リンクとの角度変化からトレイの設置誤差に伴う移動方向のずれを校正する手法である. はじめにシミュレーションによって, 各トレイに半径の異なる円軌道を課した場合の校正結果の評価を行った. 誤差1度未満での校正を目指して複数のシミュレーションを行った結果, 各トレイが半径 10 mmの円を描きながら, 45度ごとに8点をつた結果が目標精度を満たした. そこで, 上記項目(1)において製作した2次元ラックピニオンタイプとステージタイプ両方の実機を用いた実験によって検証した結果, 2次元ラックピニオンタイプでは校正後の誤差が1度を超える(1.9度)のに対して, ステージタイプでは1度未満(0.2度)であることを確認した. そのため, 以下の実験ではより精度の高い駆動および評価が可能なステージタイプを用いることとした.

次に, より簡便な校正手法として, 製作したオリジナルファントムの計測によって校正を行う手法を提案した. 試行錯誤の結果, 最終的に水中に間隔や角度の異なる複数のワイヤを張り巡らせ, その超音波撮像画像を用いて自己位置・姿勢を校正する手法を採用した. ファントムの概略図を図 2A に示し, 測定の様子を図 2B に示す. 提案手法を用いて各軸の位置と回転角度の評価を行った結果, 最終的に位置に関しては x 軸方向の位置決め誤差が最も悪く, 角度に関しては z 軸まわりの誤差が最も悪かったが, 一般的な血管径の評価は可能であることを示した. さらに, より精度を向上させるためにロボットとファントムの間の幾何学的な要因の影響について考察を行った.

(3) 自動探索・計測システムの構築

本研究の組み立て式超音波検査ロボットを用いた血管探索アルゴリズムの開発を進めた. より効率の良い探索を行うための手法として, 2本のプローブをT字形状に配置したうえで, 直

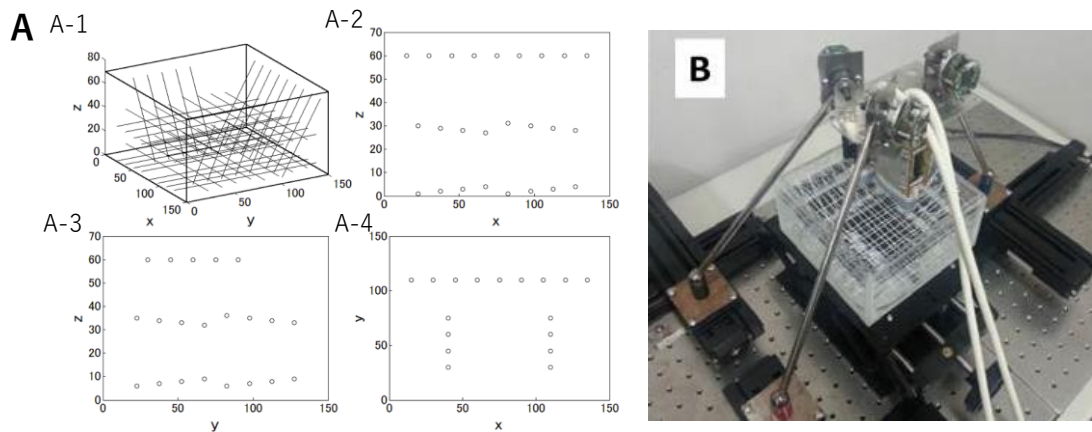


図2 (A) ファントムの模式図(A-1)と断面図(A-2 から A-4). (B)ファントムを用いた自己位置評価の様子.

進移動と回転を組み合わせた探索手法を提案した. 提案手法を用いてチューブ内に疑似血液を環流させたフロー型ファントムに対して計測を行い, さらに上腕動脈と頸動脈の計測によってT字形状でのプローブ配置を用いた探索法の有効性を確認した.

(4) 数理解析手法の提案と評価

実際の血管評価試験においては, 観測できない部位も存在するため, 観測している血管よりも上流にプラークが存在するかどうかを評価できることが望ましいと考えられる. そこで流体シミュレーションによって, 血流速の時系列と観測領域よりも上流にプラークを模した構造がある場合の数値計算を行い, 下流での血流解析を行った. その結果, 観測血管よりも上流にあるプラークの検出可能性を示すことができた.

さらに, 実際の検査に向けて上腕にカフを巻いて異なる圧力での駆血と解放を繰り返し行う実験から, 流速時系列の解析を行なった. そして平均血流時系列をカフ圧の関数として評価する手法を提案し妥当性評価を行った.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] N. Kato, S. Matsuno, M. Tateyama, Y. Ogawa, K. Kotani, and Y. Jimbo, Development of a Reassemblable Robot for Automatic Ultrasound Diagnosis, International Journal of Bioelectromagnetism, 18, 38 - 44, 2016
- [2] 松野 茂, 沼田 崇志, 岩橋 利英, 高増 潔, 小谷 潔, 神保 泰彦: 組み替えおよび分解可能な超音波検査ロボットの開発と校正手法提案, 電気学会論文誌C 138, 9, 1133-1140, 2018
- [3] 立山宗径, 木下郁英, 赤尾旭彦, 白坂将, 沼田崇志, 佐藤大樹, 神保泰彦, 小谷 潔: 姿勢変化に対する循環器, 発汗, 瞳孔径の応答評価, 電気学会論文誌C 138, 9, 1141-1147, 2018
- [4] 木下郁英, 赤尾旭彦, 白坂将, 小谷 潔, 神保泰彦: 双安定な時間遅れ力学系のスペクトルに着目した Reservoir Computing の解析, 電気学会論文誌C 138, 8, 1054-1059, 2018

[学会発表] (計 7 件)

- [1] 立山宗径, 加藤直之, 松野茂, 下野勇希, 赤尾旭彦, 小川雄太郎, 小谷 潔, 神保泰彦, “非侵襲自律神経活動評価に向けた外部刺激に対する Mayer 波の応答評価”, 電気学会 医用・生体工学研究会 (東京) (2016 年 3 月 22 日) MBE-16-040
- [2] 立山宗径, 加藤直之, 小川雄太郎, 小谷 潔, 神保泰彦 生体非周期振動時系列における相互作用評価法 ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016 2016 11 4 大阪国際交流センター 2B2-26
- [3] 加藤直之, 小川雄太郎, 立山宗径, 松野茂, 小谷 潔, 神保泰彦 超音波画像に対する動的モード分解を用いた解析手法の提案 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会 2016 8 31 神戸大学 六甲台第 2 キャンパス 1273-1274
- [4] Naoyuki Kato, Shigeru Matsuno, Munemichi Tateyama, Yutaro Ogawa, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Development of a reassemblable robot for automatic ultrasound diagnosis 8th International Workshop on Biosignal Interpretation 2016

- 11 2 大阪国際交流センター 205-208
- [5] 庭野恭彰, 小川雄太郎, 小林由弥, 小谷潔, 神保泰彦 Evaluation for measurement error of Time-Resolved Spectroscopy and application for brain function measurement
ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016 2016 11 4
大阪国際交流センター 2B1-4
- [6] 木下郁英, 赤尾旭彦, 白坂将, 小谷潔, 神保泰彦, 双安定な時間遅れ力学系のスペクトルに着目した Reservoir Computing の解析, 平成 29 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2017 年 9 月 6 日, 香川, サンポートホール高松, 1548-1549
- [7] 庭野恭彰, 赤尾旭彦, 四本裕子, 神保泰彦, 小谷潔, 時間分解分光法によるヘモグロビン濃度の推定と BOLD 信号との定量的比較, 平成 29 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2017 年 9 月 8 日, 香川, サンポートホール高松, 286-289

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。