

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870211

研究課題名(和文)メカトロニクスと医用ナビゲーションシステムの統合による超音波自動撮像システム

研究課題名(英文)Automatic ultrasound imaging system by integration of mechatronics and medical navigation system

研究代表者

小野木 真哉 (Onogi, Shinya)

九州大学・先端医療イノベーションセンター・准教授

研究者番号：40456166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、メカトロニクス技術とナビゲーション技術を統合することで、超音波診断装置を簡便な3Dモダリティとしての活用や画像ガイド下治療を実現する基盤技術について取り組んだ。メカトロニクス側としては、極めて軽量の空気圧アクチュエータを採用したプローブ走査機構を開発した。ナビゲーション側については、既存の2D超音波からリアルタイムに3Dボリュームを構築・可視化するアルゴリズムを開発した。統合システムにより、自動撮像および、治療デバイスに対する撮像断面の自動追従を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this study, automatic ultrasound imaging system by integration with mechatronics and medical navigation system to provide 3D ultrasound modality and assist image guided procedures. In the mechatronics part, I developed a probe scanning mechanism using pneumatic actuators, which are quite lightweight. As for navigation, I developed an algorithm to reconstruct 3D volume by scanning of conventional 2D ultrasound probes. From the results, I confirmed that the developed system realizes automatic 3D volume reconstruction and automatic ultrasound image guidance by following a therapeutic tool such as a needle.

研究分野：コンピュータ外科学

キーワード：ナビゲーション 超音波 ロボット 空気圧アクチュエータ 3D構築

1. 研究開始当初の背景

近年のCTやMRI, 超音波診断装置により, 体内情報を低侵襲に取得することが可能となり, 画像診断は現代の医療に不可欠となっている. また, 診断だけでなく術中にリアルタイムな画像を取得することによる, より安全な低侵襲手術が試みられている. 当初は二次元であった医用画像は3次元さらには4次元と発展してきており, リアルタイムな3次元画像情報が利用可能となりつつある. これらの高次元医用画像において, 画像撮像位置を制御することは不可欠である.

CTやMRIでは撮像位置がX線照射部の位置や傾斜磁場などによって決まるため, 装置内部で三次元的な位置が定まっている. そのため, プレスキャン画像中でさらに詳細に取得する部位を選択する様なGUI及び位置情報に基づいた撮像が可能となっている. しかしながら, CT・MRIは極めて高価であり導入できる医療機関は限られている. また, 大型かつ特殊なシールドを必要とするために導入するには非常に大規模な工事が必要となる. そのため, 従来型の手術室や診断室にこれらの機器を導入することは難しく, 術中CT・MRIは研究機関において限定的に試みられているのが現状である. 一方, 超音波画像診断装置はCTやMRIと比較して, 小型・安価・低侵襲という長所がある. しかし, 超音波診断装置は内部に3次元位置情報を持っていないため, 検査技師はプレスキャン画像に基づいて撮像箇所を決定する様なことはできず, 画像を見ながらプローブ位置・姿勢を微調整する必要がある. また, 位置決め再現性はなく, 複数回に分けて撮像した画像をCTの様に統合して3次元ボリュームとすることはできない. さらに, プローブの重量は数百グラムであり検査技師にとって負担が大きい. これは疲労だけでなく, 職業病として腱鞘炎の原因となっている.

2. 研究の目的

本研究では, 背景で述べた超音波診断装置の課題を技術的に解決することで, CTやMRIの代替となり得る3次元ボリュームの構築や安全・確実な超音波ガイド下治療を実現するために, メカトロニクス技術と医用ナビゲーション技術を統合した超音波撮像システムを開発することを目的とした.

3. 研究の方法

(a) プローブ走査ロボットの開発

超音波プローブを6自由度制御するために, 空気圧アクチュエータ6つとプローブ回転用のDCモータで構成されるプローブ走査機構を開発した. プローブの回転以外は, 空気圧アクチュエータを用いたワイヤー駆動方式とすることで, 患者体表面を走査する際に過剰な押し付けが生じない機構とした(Fig.1).

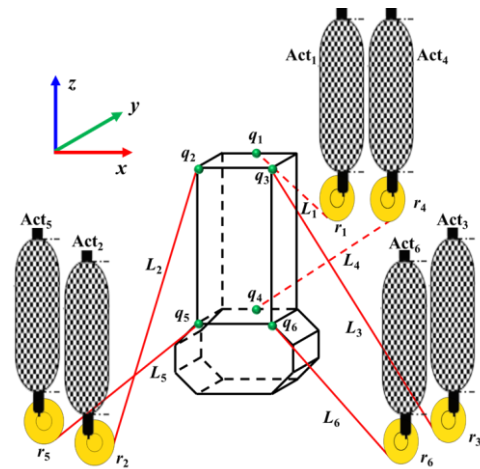


Fig. 1 Wire driven mechanism of the probe scanning robot.

制御においては, プローブの撮像断面の位置を制御する方式を考案した. Fig. 2に示すようにプローブ把持機構とフレーム機構に光学マーカーを設置し, プローブ把持機構のマーカーから撮像断面への変換行列をキャリブレーションすることで, フレーム機構(本ロボットの基準座標系)に対する撮像断面の位置を制御することが可能となる.

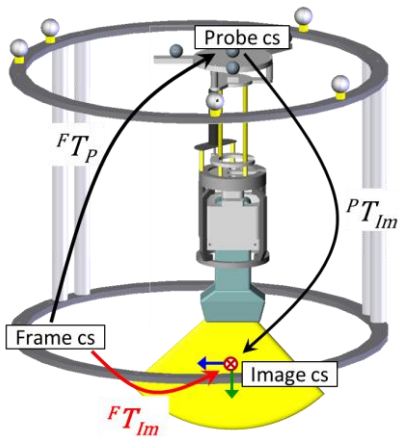


Fig. 2 Coordinate transformation between the frame mechanism, probe holding mechanism, and the B-scan plane (image plane).

(b) 自動・正確な超音波キャリブレーション
 Fig. 3 にキャリブレーションの概要を示す。金属球を基準マーカーとし、光学式一計測装置で計測した金属球の位置と超音波画像中における金属球の位置からプローブに取り付けられた光学マーカーと画像座標系間の変換行列を推定する。また、画像中における金属球位置は、全自動の画像処理手法を考案した。Fig. 4 に示すように、超音波画像中の金属球の多重反射を検出し、その後、金属球の輪郭を抽出、円近似により球の中心位置を求めることができる。

(c) ロボットと医用ナビゲーションの統合による撮像断面の位置制御手法の確立とその情報呈示

本システムの応用として、フリーハンド超音波ガイド下穿刺支援として、撮像断面の自動追従ナビゲーションについて検討した。

針の位置に対する撮像断面位置の制御について Fig. 5 に示す。図のように針と断面位置に差がある場合、並進と鉛直軸周りの回転により、針が常に断層像に含まれる様な制御が可能である。

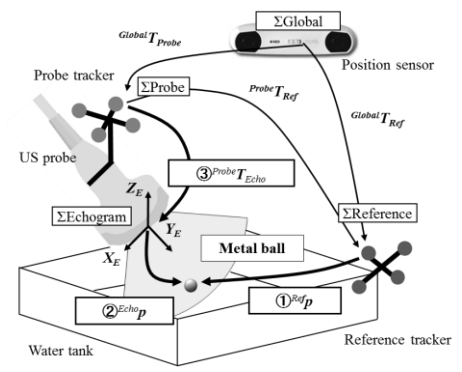


Fig. 3 Method of ultrasound calibration.

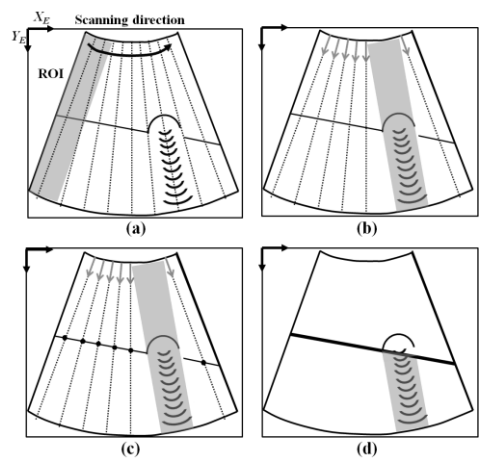


Fig. 4 Automatic metal ball position detection by 'comet tail' artifact.

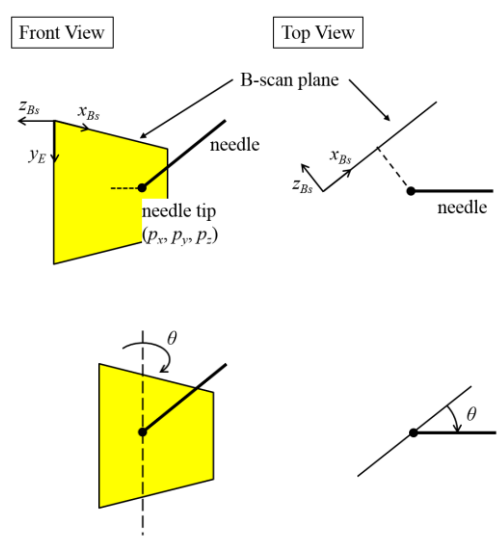


Fig. 5 Echogram plane position control for ultrasound needle navigation.

提案手法の評価として、水槽内に金属球を設置し、プローブ接触面としてゴムで覆った

実験系を構築した。光学マーカーを取り付けた針を用いて、針を動かした場合の撮像断面の追従について評価した。評価では、針先端と断層像の距離および姿勢について算出した。

(d) 複数回に分けて取得された画像の統合アルゴリズム

本システムで自動的にスキャンし、3D ボリュームを構築するアルゴリズムについて検討した。

断層像の厚みを考慮して複数の断層像からボリュームを再構築するアルゴリズムを考案した(業績・論文 3)。ゴム球を内包するゴム袋をファントムとし、本アルゴリズムによる再構築ボリュームの評価を実施した。

4. 研究成果

(a) プローブ走査ロボットの開発

開発したロボットを Fig. 6 に示す。また、ロボットの基本性能として、一定の周期で駆動する指令を与えた場合の追従について評価した。代表的な結果を Fig. 7 に示す。

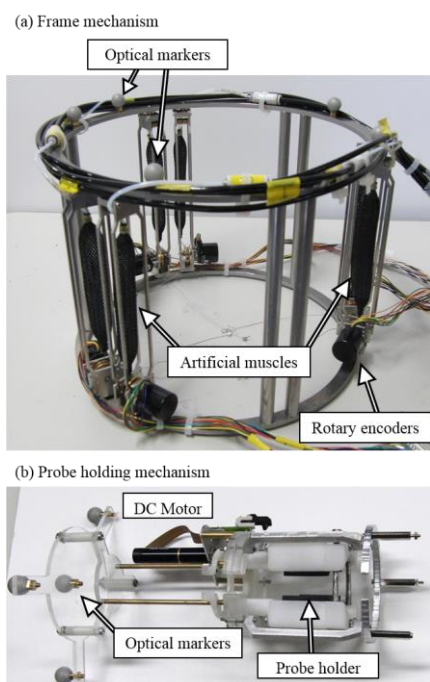


Fig. 6 The developed probe scanning robot.

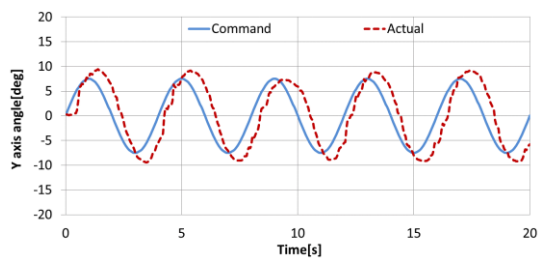


Fig. 7 Result of mechanical test of the robot.

(b) 自動・正確な超音波キャリブレーション提案したキャリブレーション手法の精度

評価を実施した。結果、50 回の金属球を測定することで、RMS 誤差は 3.0mm 以下で安定した結果が得られることが確認された。

(c) ロボットと医用ナビゲーションの統合による撮像断面の位置制御手法の確立とその情報呈示

Fig. 11 に針をフリーハンドで動かした場合の、ロボットによる撮像断面の追従の様子を示す。また、その時の位置・姿勢誤差を Fig. 9 に示す。結果より、撮像断面が針の位置に追従できていることが確認された。

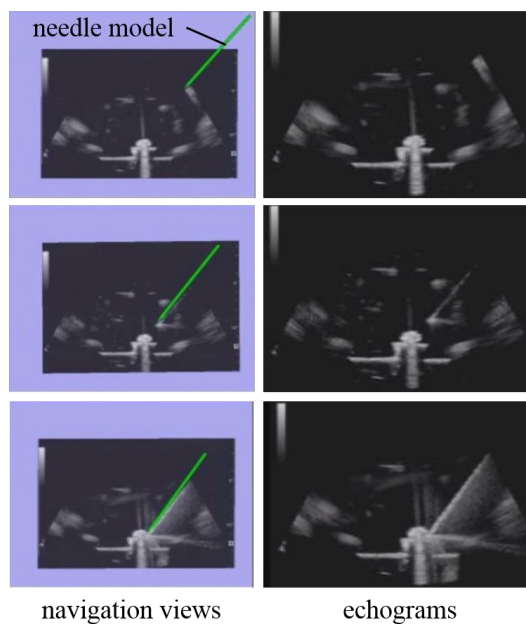


Fig. 10 Result of ultrasound needle guidance.

(d) 複数回に分けて取得された画像の統合アルゴリズム

考案したアルゴリズムによるファントムのボリューム構築結果を Fig. 10 に示す。また、超音波画像をリファレンスとして同一位置でボリュームをリスライスした画像と比較したところ、相関値は 0.80 であり許容できる画像であることが確認された。

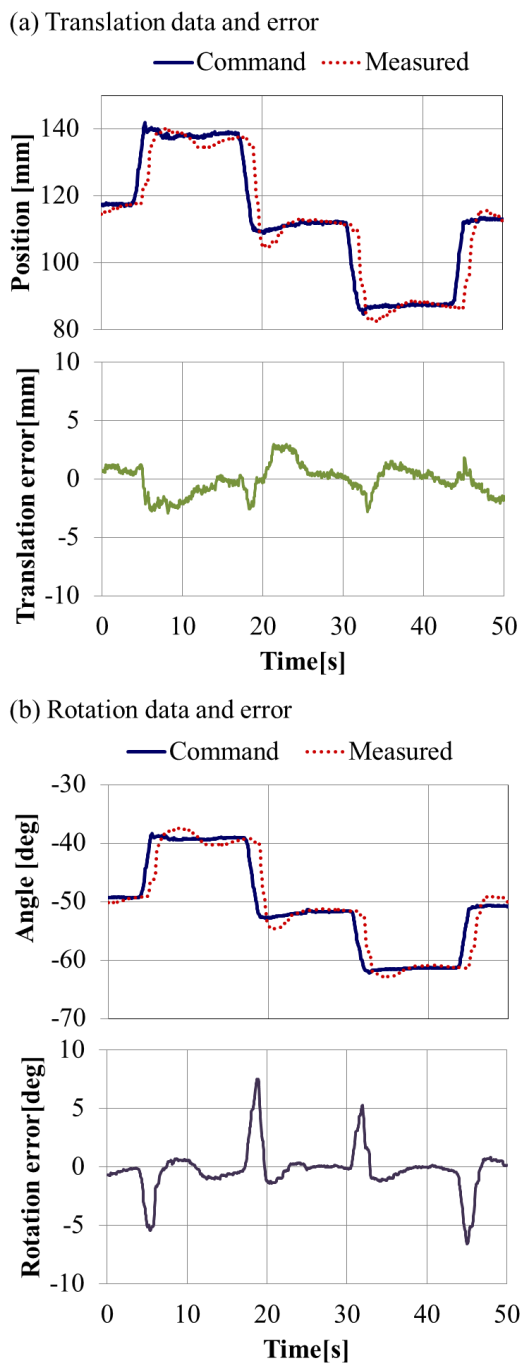


Fig 11 Error of ultrasound needle guidance.

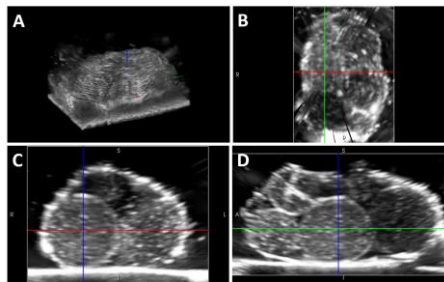
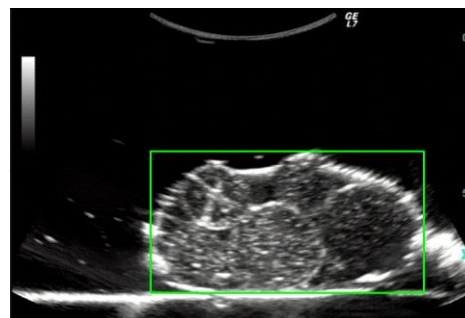


Fig. 12 Reconstructed volume and three orthogonal slices.



(i) Reference image (raw echogram)



(ii) resliced of reconstructed volume

Fig. 13 Validation of reconstructed volume by image correlation

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 菅野悠樹, 小野木真哉, 吉田寿夫, Antoine Bossard, 望月剛, 榊田晃司, “金属球マーカーを用いた自動かつ高精度なフリーハンド超音波キャリブレーション,” 日本コンピュータ外科学会誌 15(1):11-21, 2013.
- 吉田寿夫, 小野木真哉, 齊藤俊, 菅野悠樹, 望月剛, 榊田晃司, “空気圧アクチュ

エータを用いた超音波プローブ走査機構の開発と撮像断面の位置制御,” 日本ロボット学会誌 32(3):265-274, 2014.

3. S. Onogi, J. Wu, T. Yoshida, K. Masuda, “Patient-mounted Robot for 2D Ultrasound Probe Scanning using McKibben Artificial Muscles,” *Advanced Biomedical Engineering* 3:130-138, 2014.

[学会発表] (計 10 件)

1. S. Onogi, T. Yoshida, Y. Sugano, T. Mochizuki, and K. Masuda, “Robotic Ultrasound Guidance by B-scan Plane Positioning Control,” in *Procedia CIRP* 5, pp.100-103, the first CIRP Conference on Biomanufacturing, Tokyo, March 4-6, 2013.
2. T. Yoshida, S. Onogi, Y. Sugano, S. Saito, T. Mochizuki, and K. Masuda, “Image Plane Positioning by Pneumatic Actuators for Ultrasound Guidance,” *35th Ann Int Conf IEEE EMBS (EMBC2013)*, pp. 4945-4948, Osaka, Japan, July 3-7, 2013.
3. 吉田寿夫, 小野木真哉, 吳佳蔚, 菅野悠樹, 榊田晃司, “空気圧駆動型超音波プローブ走査機構による手術ナビゲーションシステム,” 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013 年 9 月.
4. 小野木真哉, 吳佳蔚, 吉田寿夫, 望月剛, 榊田晃司, “空気圧アクチュエータを用いた超音波プローブ走査ロボットによる体表面プローブ走査,” *日本コンピュータ外科学会誌* 15(2), pp. 150-151, 第 22 回日本コンピュータ外科学会大会, 東京, 9 月, 2013 年.
5. 吳佳蔚, 吉田寿夫, 小野木真哉, 榊田晃司:「超音波ガイド下治療における空気圧駆動ロボットによる三次元プローブの xPlane 画像を用いたビジュアルサーボ」, 第 53 回日本生体医工学会大会プログラム・論文集, 2014 年, 仙台, CD-ROM
6. 吳佳蔚, 吉田寿夫, 小野木真哉, 榊田晃

司:「超音波ガイド下治療のための超音波プローブの空気圧駆動 3 次元ビジュアルサーボ」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, 2014 年, 富山, 3A1-E01

7. S. Onogi, T. Yoshida, J. Wu, K. Masuda, “Ultrasound probe scanning system for 3D volume reconstruction and needle guidance,” *the 28th Int Conf Comput Assist Radiol Surg (CARS 2014)*. June 25-28, 2014, Fukuoka, Japan.
8. S. Onogi, T. Yoshida, J. Wu, K. Masuda, “Patient-Mounted Robot for 2D Ultrasound Probe Scanning by using McKibben Artificial Muscles,” *生体医工学シンポジウム 2014 講演予稿集*, 2014, 東京, p.164.
9. 小野木真哉, 吳佳蔚, 馬場稔, 橋爪誠, 榊田晃司, “超音波直交二断面画像を用いた空気圧駆動超音波プローブ走査機構による目標物体の追従制御,” 第 54 回日本生体医工学会大会プログラム・論文集, 2015 年, 名古屋, p.207.
10. S. Onogi, J. Wu, M. Baba, M. Hashizume, K. Masuda, “Robotic Target Following using Two Orthogonal Ultrasound Images,” *The 37th Ann Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc (EMBC 2015)*, Aug. 25-29, 2015, Milano, Italy.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野木 真哉 (Onogi Shinya)

九州大学・先端医療イノベーションセンター・准教授

研究者番号: 40456166