

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25350568

研究課題名（和文）生体に適用可能な超音波ビジュアルサーボの開発とその集束超音波治療への応用

研究課題名（英文）Robust visual servoing for medical ultrasound for HIFU therapy

研究代表者

中楯 龍（Nakadate, Ryu）

九州大学・先端医療イノベーションセンター・助教

研究者番号：40584470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は一般の医療機関に普及している超音波診断装置のプローブをロボットに持たせ、その画像情報をコンピュータで処理することにより、呼吸等で移動する人間の臓器の特定断面を常に自動で捉え続けるシステムの開発を目的とし、専用のロボットを開発しさらに追従性能の高精度化に取り組んだ。患者の呼吸情報と画像情報とのセンサフュージョンにより、フィードバックのみの制御に比べ格段に追従誤差を減少させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：The study aim was to develop a robotic system which holds a medical ultrasound probe and automatically keeps tracking the target cross section of the human organ even if it is moving by respiratory motion. We have developed a new probe holding robot and algorithms for improving the tracking performance. By using sensor fusion of the patient respiratory volume and ultrasound image, we have successfully achieved a significant reduction of the tracking error compared with the traditional image feedback control.

研究分野：工学

キーワード：超音波診断ロボット

1. 研究開始当初の背景

強力超音波を体内の一点に集束させ、そのエネルギーで患部を焼灼する集束超音波治療 (High Intensity Focused Ultrasound : HIFU) は、皮膚切開や放射線被ばくの無い次世代の超低侵襲治療法として期待されているが、消化器などの腹部臓器に対しては呼吸性移動等による照射ポイントのずれが課題であり、患部を正確にリアルタイムで追従することができればこの治療に有用である。追従のために必要な体内の患部画像を得る手段としては超音波診断装置が他のモダリティと比べ非侵襲でリアルタイム画像が得られる点で、かつ多くの医療機関に普及しているため好ましい。しかしながら、一般のプロローブは2次元断面しか得られないため3次元の追従は難しく、また画像転送に起因する若干の時間遅れにより追従性能が劣化する問題があった。

2. 研究の目的

本研究は、追従開始直前にスキャンして記録した患部周辺の微小範囲の超音波3Dデータと追従中に観測した2Dデータのマッチングにより、通常の2D超音波プロローブのみで構成する3Dビジュアルサーボの性能を、生体の治療に適用可能な程度に高めることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 超音波プロローブ把持ロボットの開発
臓器の移動量、速度を計測した上で要求仕様を抽出し、高精度・高速な位置決めと機械的・電気的な安全性を両立させる機構を検討、設計した。まず包括的なリスクマネジメントを行い、電気的・ソフトウェア上での誤動作リスクに対するフェールセーフを実現するため、物理的な安全性を担保することとし、暴走した時でも可動範囲において患者にダメージを与えない機構を念頭に置いた。

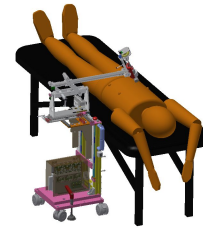
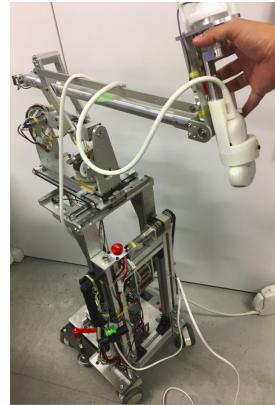
(2) 追従アルゴリズム

従来の画像フィードバックによる追従誤差の要因と限界点を明らかにした上で、それを解決するための新たなアルゴリズムの開発に取り組み、実験により評価した。

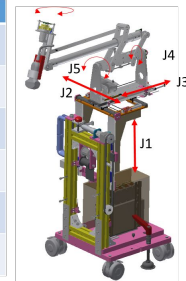
4. 研究成果

(1) 超音波プロローブ把持ロボットの開発
安全性の検討の結果、直動3自由度はXYZステージとし、その上に遠隔回転中心を持たせた回転3自由度を配置した。これによりプロローブの姿勢にかかわらず可動範囲が物理的に限定され安全性が担保でき、姿勢の可動範囲が位置に寄らず一定となり、また位置による姿勢精度のばらつきが無くなるというメリットがあった。アクチュエータの出力を出来るだけ小さいものにする、また呼吸性移動の追従においては十分な加速度がトランスデューサ末端で得られる必要があることから、エンドエフェクタは軽くイナーシャ

の小さいことを重視した。ロボットの安全性をさらに高めるため、定加重ばねを用いた全軸の完全自重補償の追加により、モータへの定常負荷を減らす、姿勢3軸へのアブソリュートエンコーダの付加により追加の誤動作検知機能を持たせる、等の安全対策を行った。



Joints	Workspace	Motor	Limit Sensor
J1 (trans.Z)	±91mm	DCX22 62:1	Photo x2
J2 (trans.X)	±98mm	DCX12 21:1	Photo x2
J3 (trans.Y)	±85mm	DCX12 21:1	Photo x2
J4 (rotat.)	±56deg	DCX22 138:1	Magnetic Rotary Encoder
J5	±55deg	DCX22 138:1	Magnetic Rotary Encoder
J6	±180deg	DCX12 21:1	Magnetic Rotary Encoder



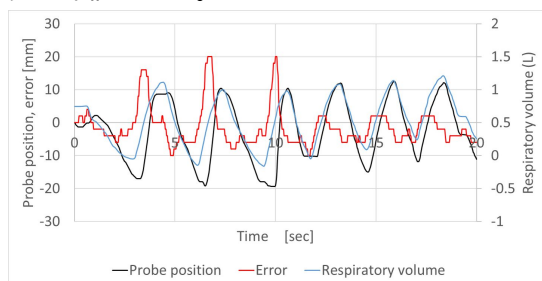
(2) 追従アルゴリズムの性能向上

ビジュアルサーボ系においては画像の取り込みや画像処理によるレイテンシが無視できない程度に存在すること、また可動部を軽量にする設計をしているものの必ずイナーシャが存在することから、時間遅れを伴うサーボ系となる。このため、追従誤差はフィードバック系を用いる限り、対象物の移動速度と時間遅れから求まる一定値より小さくすることができない。これを解決するため、肝臓の位置は被験者の呼吸によって定まると仮定し、呼吸を患者が口にくわえるフローセンサにより検知してフィードフォワード系を組み、追従誤差の縮小を図った。具体的には過去10秒間(呼吸2サイクル分)の臓器移動変位と呼吸量データを最小二乗法により線形近似しこれを常にアップデートし、その近似式と現在の呼吸量からプロローブ位置指令を算出した。臓器移動変位は「現プロローブ位置+画像処理から求まる追従誤差」で求め、後者は時間遅れ200ms分を調整して用いた。追従開始後、まず画像フィードバックのみで追従を行い10秒後に上記のフィードフォワード制御に切り替えた。

(3) 性能評価

実際のヒト成人被験者にて肝臓の呼吸性移動の追従実験を行った。プロローブは体幹と垂直とした。肝臓の主移動方向は撮像断面に対して垂直(3D追従)である。下図の最初の10秒(左半分)は従来の制御(画像フィードバックのみ)であり、特に呼吸気開始

時に大きな追従誤差が出ている。10秒以降（右半分）は呼吸センシングによるフィードフォワード制御であり、追従誤差の大幅な減少が確認できた。



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1件)

Nakadate R, Arata J, Hashizume M, Next-Generation Robotic Surgery - from the aspect of surgical robots by industry-, Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, 24:2-7, 2015 (査読あり)

〔学会発表〕(計15件)

竹下和慶, 萱沼大, 早淵貞士, 仁木清美, 菅原基晃, 中楯龍, 石井裕之, 高西淳夫, 超音波による頸動脈計測自動化のためのロボットシステムの開発, 日本生体医工学会 関東支部 若手研究者発表会 2016, 2016.11.19, 埼玉

早淵貞士, 萱沼大, 仁木清美, 平山貢大, 竹下和慶, 中楯龍, 石井裕之, 高西淳夫, ロボットシステムによる頸動脈検査技術の開発, 日本生体医工学会 関東支部 若手研究者発表会 2016, 2016.11.19, 埼玉

Jumpei Arata, Kazunari Fukami, Susumu Oguri, Tetsuo Ikeda, Ryu Nakadate, Shinya Onogi, Masamichi Sakaguchi, Tomohiko Akahoshi, Kanako Harada, Mamoru Mitsuishi, Makoto Hashizume, Mechanical evaluation of Laparoscopic Ultrasound Manipulator using a Spring based Elastic Mechanism, The 12th Asian Conference on Computer Aided Surgery, P52, 2016.10.14, Korea

Jumpei Arata, Kazunari Fukami, Susumu Oguri, Tetsuo Ikeda, Ryu Nakadate, Shinya Onogi, Masamichi Sakaguchi, Tomohiko Akahoshi, Kanako Harada, Mamoru Mitsuishi, Makoto Hashizume, Laparoscopic Ultrasound Manipulator based on a Spring based Elastic Mechanism, Computer Assisted Radiology 29th International Congress and Exhibition

(CARS 2016), 2016.6.21, Hamburg(Germany)

S. Onogi, T. Ikeda, J. Arata, R. Nakadate, S. Oguri, T. Akahoshi, K. Harada, M. Mitsuishi, M. Hashizume, Intraoperative three dimensional ultrasound reconstruction and visualization for endoscopic liver surgery, Computer Assisted Radiology 29th International Congress and Exhibition (CARS 2016), 2016.6.21, Hamburg(Germany)

小野木真哉, 荒田純平, 中楯龍, 小栗晋, 赤星朋比古, 池田哲夫, 原田香奈子, 光石衛, 橋爪誠, "腹腔鏡下手術において超音波装置を術中診断, 治療支援およびナビゲーションに活用することを可能とするハンドヘルド型・多自由度電動アームの開発", 第116回日本外科学会定期学術集会, 2016.4.14, 大阪

小野木真哉, 荒田純平, 中楯龍, 小栗晋, 赤星朋比古, 池田哲夫, 原田香奈子, 光石衛, 橋爪誠, 腹腔鏡下超音波のためのナビゲーションシステムの開発, 第116回日本外科学会定期学術集会, 2016.4.14, 大阪

小野木真哉, 荒田純平, 中楯龍, 小栗晋, 赤星朋比古, 池田哲夫, 原田香奈子, 光石衛, 橋爪誠, 腹腔鏡下超音波のための三次元画像の構築・可視化システム, 第9回肝臓内視鏡外科研究会, 2015.11.25, 福岡

荒田純平, 小栗晋, 池田哲夫, 中楯龍, 小野木真哉, 赤星朋比古, 原田香奈子, 光石衛, 橋爪誠, 腹腔鏡下肝切除に有用な超音波走査自在電動アーム, 第9回肝臓内視鏡外科研究会, 2015.11.25, 福岡

Susumu Oguri, Jumpei Arata, Tetsuo Ikeda, Ryu Nakadate, Shinya Onogi, Tomohiko Akahoshi, Kanako Harada, Mamoru Mitsuishi, Makoto Hashizume, Multi Degrees Of Freedom Laparoscopic Ultrasound Probe With Remote Center Of Motion, Computer Assisted Radiology 29th International Congress and Exhibition (CARS 2015), S242-244, 2015.6.24, Spain

Y. Sugamiya, S. Ammar, R. Nakadate, H. Ishii, A. Saito, M. Sugawara, K. Niki, A. Takanishi, Intercostal localization for automated ultrasound diagnosis system of abdominal area, Computer Assisted Radiology 28th International Congress and Exhibition (CARS 2014), S294-295, 2014, Fukuoka

Ammar Safwan Bin Mustafa, Takashi Ishii, Yoshiki Matsunaga, Ryu Nakadate, Hiroyuki Ishii, Kouji Ogawa, Akiko Saito, Motoaki Sugawara, Kiyomi Niki, Atsuo Takanishi, Human

Abdomen Recognition Using Camera and Force Sensor in Medical Robot System for Automatic Ultrasound Scan, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2013), 4855 - 4858, 2013

Ryu Nakadate, Ammar Safwan Bin Mustafa, Hiroyuki Ishii, Akiko Saito, Atsuo Takanishi, Makoto Hashizume, 3D Tracking of Respiratory Liver Movement by a Robot Assisted Medical Ultrasound, The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2013), 50-51, 2013, Tokyo

菅宮 友莉奈, 中楯 龍, 石井裕之, アマルサフワン, 斎藤 明子, 菅原 基晃, 仁木 清美, 高西 淳夫, 超音波診断装置による肝臓領域の自動操作制御系構築のための肋間認識と肋間走査, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 1G2-06, 2013

Bin Mustafa A.S., Ishii T., Matsunaga Y., Nakadate R., Ishii H., Ogawa K., Saito A., Sugawara M., Niki K., Takanishi A., Development of robotic system for autonomous liver screening using ultrasound scanning device, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2013), 804-809, 2013

〔図書〕(計1件)

Ryu Nakadate, Ammar Safwan Bin Mustafa, Hiroyuki Ishii, Akiko Saito, Atsuo Takanishi, Makoto Hashizume, 3D Tracking of Respiratory Liver Movement by a Robot Assisted Medical Ultrasound, Computer Aided Surgery. Springer Japan, pp.17-25, 2016

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計1件)

名称: 超音波プローブの位置姿勢提示システム、画像生成装置及びそのプログラム

発明者: 藤江正克、小林洋、築根まり子、一柳健、小笠原伸浩、張博、橋爪誠、池田哲夫、中楯龍

権利者: 早稲田大学、菊池製作所、九州大学

種類: 特許

番号: 5939601

取得年月日: 2016/5/27

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://camiku.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中楯 龍 (NAKADATE Ryu)

九州大学・先端医療イノベーションセンター・助教

研究者番号: 40584470

(2) 研究分担者

剣持 一 (KENMOTSU Hajime)

九州大学・先端医療イノベーションセンター・特任助教

研究者番号: 60215134

橋爪 誠 (HASHIZUME Makoto)

九州大学・医学研究院・教授

研究者番号: 90198664

石井 裕之 (ISHII Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号: 10398927

東 隆 (AZUMA Takashi)

東京大学・大学院医学系研究科・教授

研究者番号: 90421932

斎藤 明子 (SAITO Akiko)

東京女子医科大学・医学部・准教授

研究者番号: 60101854

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし