

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686040

研究課題名(和文) 生体に対して高精度かつ安全に動作する非侵襲超音波診断・治療統合システムの構築

研究課題名(英文) Construction Methodology of Non-Invasive Ultrasound Theragnostics (NIUTS) which is highly precise and safe for body

研究代表者

小泉 憲裕 (Koizumi, Norihiro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：10396765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、動物実験レベルで生体に高精度かつ安全に追従動作する非侵襲超音波医療診断・治療統合システムの構築法を確立することであった。成果として、実際のヒトの臓器に対して体動の90%を補償、1mmというきわめて高い精度での患部追従を実現した(日経新聞の科学面に掲載)。

また、高精度かつ頑健な追従を実現するうえで克服すべき最大の障壁となる、追従のための画像の質を劣化させるノイズ要因についても明らかにし、多くの有効な解決策を提案した。一例として、最重要のコア基盤技術と位置づける体動補償に関する出願特許が拒絶理由通知なしに特許登録された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish the construction methodology for the Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System (NIUTS), which is highly precise and safe for the body targets at the level of animal experiments.

As a result, we achieved 90 percent of physiological motion compensation and 1mm precision of servoing performance for the real human organ (Reported in Nihon Keizai Shinbun). We also clarified the problems and proposed efficient solutions to realize the highly precise and robust physiological motion tracking for the focal lesion. For example, one of our core technologies is registered as a Japan Patent (JP5311392, all patent claims are admitted).

研究分野：工学

キーワード：医療ロボット 医デジ化 医療技能の技術化・デジタル化 超音波診断・治療統合システム 超音波診断・治療ロボット 超音波診断ロボット 超音波治療ロボット 強力集束超音波

1. 研究開始当初の背景

本研究の学術的背景としては、下記の2点が挙げられる。1点めは、ITおよびロボット技術(I RT)を利用して人間の熟練した技能を再構築する、言わば“技能の技術化・デジタル化”がテクノロジーの発達とともに可能になりつつあることである。すでに製造業分野では、人間では不可能な高精度の作業がロボットによって実現されている。高度な技能を要求される医療分野においても医療診断・を実現することが期待されている。

2点めは、強力集束超音波(High Intensity Focused Ultrasound: HIFU)による非侵襲治療の顕著な発達である。これは、球面型の超音波振動子を用いて超音波を集束させることにより、周りの体組織に損傷を与えることなく、体内の狭い領域にエネルギーを集中させるというものであり、周囲の正常な組織を損傷させることなく患部のみを治療することができる。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、腎がん、腎結石の医療診断・治療を対象として、超音波技術およびI RT技術を基盤として、非侵襲超音波診断・治療統合システムの構築法を確立することであり、研究期間内に、生体に対して精度を損なうことなく安全・安心に動作するシステムを実現するとともに、動物実験レベルでシステムの有効性および安全性を実証する。

本研究で提案する非侵襲超音波診断・治療統合システムとは、呼吸や拍動等により能動的に運動する患部を抽出・追従・モニタリングしながら、超音波を集束させてピンポイントに患部へ照射することにより、がん組織や結石の治療を患者の皮膚表面を切開することなく非侵襲かつ低負担で行なおうとするものである。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、下記の5つの作業手順を順次遂行することで、医療技能を機能として抽出、構造化し、関数としてシステムの機構・制御上に実装(医療技能の技術化・デジタル化: 医デジ化)する。その際、必要ならば専門医の医療技能に啓発された全く新しいアプローチから機能を追加・実装することにより、さらなる医療の質の向上(高速・高精度化)を図る。これにあたっては、我々が開発してきた独自のコア技術を基盤として、これを発展させることで行なう。

<作業手順>

- (1) 医療診断・治療技能を機能として抽出・構造化,
- (2) 機能におけるパラメータ解析,
- (3) 機能の設計指針化,
- (4) 機能の実装,
- (5) 実験による機能の評価・改良

4. 研究成果

実際のヒトの腎臓に対して、体動の90%を補償し、1mmの精度で追従する体動補償シス

テムを開発し、動物実験のみならずヒト実験レベルで開発したシステムの有効性を確認した。

本研究プロジェクトの成果は日経新聞科学技術面への掲載、2015年度日本設計工学会 The Most Interesting Reading 賞受賞、医療ロボットのDa Vinciで有名なIntuitive Surgical社の研究者によるReview Articleにおいて、医療ロボットの体動補償研究のパイオニアかつ中核的な存在として大きく取り上げられるなど、学会をはじめ、国内外の企業や研究者から大きな注目と高い評価を得ている。

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7件)

1. Norihiro Koizumi, Kouhei Oota, Dongjun Lee, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Kiyoshi Yoshinaka, Takashi Azuma, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "System Identification Method for Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System Incorporating Mechanical Oscillation Part," in *International Journal of Automation Technology (IJAT)*, Vol.8, No.1, pp.110-119, 2014.
2. Norihiro Koizumi, Takehiko Tsurumi, Takahiro Kato, Shin'ichi Warisawa, Mitsuru Nagoshi, Hiroyuki Hashizume, and Mamoru Mitsuishi, "Remote Ultrasound Diagnostic System," in *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.26, No.3, pp.396-397, 2014. IF=0.5.
3. 小泉憲裕, 月原弘之, 光石 衛, "医デジ化にもとづく超音波医療診断・治療統合システムの構築法," *設計工学会誌*, Vol.49, No.6, pp.6-13, 2014. 2015年度日本設計工学会 The Most Interesting Readings 賞受賞
4. Norihiro Koizumi, Joonho Seo, Takakazu Funamoto, Yutaro Itagaki, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Hiroyuki Tsukihara, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Construction Methodology for NIUTS -Bed Servoing System for Body Targets-," in *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.25, No.6, pp.1088-1096, 2013.
5. Norihiro Koizumi, Deukhee Lee, Joonho Seo, Takakazu Funamoto,

- Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Technologizing and Digitalizing Medical Professional Skills for a Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System," in *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.24, No.2, pp.379-388, 2012.
6. Joonho Seo, **Norihiro Koizumi**, Takakazu Funamoto, Naohiko Sugita, Kiyoshi Yoshinaka, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Biplane US guided real-time volumetric target pose estimation method for theragnostic HIFU system," in *Journal of Robotics and Mechatronics (JRM)*, Vol.23, No.3, pp.400-407, 2011.
 7. Joonho Seo, **Norihiro Koizumi**, Takakazu Funamoto, Naohiko Sugita, Kiyoshi Yoshinaka, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Visual Servoing for a US-guided therapeutic HIFU system by coagulated lesion tracking: a phantom study," in *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (IJMRCAS)*, Vol.7, pp.237-247, 2011.

[学会発表](計 17 件)

1. Hiroyuki Fukuda, Nobutaka Doba, Kazushi Numata, Ayako Takeda, Yoshiharu Hao, Akito Nozaki, Masaaki Kondo, Makoto Chuma, Shin Maeda, Tatsuya Fujii, Dongjun Lee, **Norihiro Koizumi**, Hiroyuki Tsukihara, Mamoru Mitsuishi, Yoichiro Matsumoto, and Katsuaki Tanaka, "Respiratory Tracking System of Hepatocellular Carcinoma Treatment Using FUS," *Focused Ultrasound 2014 - 4th International Symposium*, 2014.10.12-16, Bethesda North Marriott Hotel and Conference Center, Washington D.C., USA.
2. **Norihiro Koizumi**, Dongjun Lee, Joonho Seo, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Takashi Azuma, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "A novel redundant motion control mechanism in accordance with medical diagnostic and therapeutic task functions for a NIUTS," *2014 IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robotics and Systems (IROS 2014)*, pp.2009-2016, TuB1.6, 2014.9.14-18, Palmer House Hilton, Chicago, USA, (DOI: [10.1109/IROS.2014.6942830](https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942830)).
3. **Norihiro Koizumi**, Dongjun Lee, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Takashi Azuma, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Problems in motion tracking for body targets by PD control and their solutions," *CARS 2014 Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2014.6.25-28, Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan.
4. **Norihiro Koizumi**, Takakazu Funamoto, Joonho Seo, Dongjun Lee, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Takashi Azuma, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "A novel robust template matching method to track and follow body targets for NIUTS," *2014 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 2014)*, pp.1929-1936, MoD12.3, 2014.5.31-6.5, Hong Kong Convention and Exhibition Center, Hongkong, China, (DOI: [10.1109/ICRA.2014.6907114](https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907114)).
5. Dongjun Lee, **Norihiro Koizumi**, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Construction of kidney phantom model with acoustic shadow by rib bones and respiratory organ motion," *14th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU 2014)*, No.230, 2014.4.2-5, Caesars Palace, Las Vegas, USA, 2014. **Travel award for the 2014 ISTU Symposium 受賞**
6. **Norihiro Koizumi**, Dongjun Lee, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Kiyoshi Yoshinaka, Motohiro Kawasaki, Naohiko Sugita, Takahiro Ushida, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Servoing performance enhancement for body targets for NIUTS," *14th International Symposium on*

- Therapeutic Ultrasound (ISTU 2014)*, No.226, 2014.4.2-5, Caesars Palace, Las Vegas, USA, 2014.
7. Junchen Wang, You Zhou, **Norihiro Koizumi**, Naoto Kubota, Takeharu Asano, Kuzuhito Yuhashi, Tsuyoshi Mitake, Kazunori Itani, Toshiaki Tkahashi, Shigemi Takeishi, Shiro Sasaki, Takashi Kadowaki, Ichiro Sakuma, and Hongen Liao, "Automatic Distance Measurement of Abdominal Aorta for Ultrasonography-based Visceral Fat Estimation," *35th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2013)*, pp.6486-6489, 2013.7.3-7, Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, (DOI: [10.1109/EMBC.2013.6611040](https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6611040)).
 8. **Norihiro Koizumi**, Kouhei Oota, Akira Nomiya, Hiroyuki Tsukihara, Kiyoshi Yoshinaka, Takashi Azuma, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "A Mechanical System Identification Method for Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System ," *First CIRP Conference on BioManufacturing (BioM 2013)*, OS7-05, 2013.3.7, The Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan. **Selected as one of the excellent papers that was presented in BioM 2013 by the BioM program committee, International Journal of Automation Technology (IJAT)への投稿推薦**
 9. **Norihiro Koizumi**, Yutaro Itagaki, Takakazu Funamoto, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Construction Methodology for the Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System (4th report) - Bed-Type Servoing System for Body Targets -," *First CIRP Conference on BioManufacturing (BioM2013)*, OS7-04, 2013.3.7, The Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan.
 10. **Norihiro Koizumi**, Takakazu Funamoto, Joonho Seo, Naohiko Sugita, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Robustness enhancement of motion compensation for a non-invasive ultrasound theragnostic system," *CARS 2012 Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2012.6.27-30, Congress Palace, Pisa, Italy.
 11. **Norihiro Koizumi**, Deukhee Lee, Joonho Seo, Takakazu Funamoto, Naohiko Sugita, Kiyoshi Yoshinaka, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Technologizing and Digitalizing of Medical Professional Skills for a Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System," *ASME/ISCFE 2012 International Symposium on Flexible Automation (ISFA 2012)*, 2012.6.18-20, The Marriott Union Station Hotel, St. Louis, MO, USA (DOI: [10.1115/ISFA2012-7118](https://doi.org/10.1115/ISFA2012-7118)).
 12. **Norihiro Koizumi**, Joonho Seo, Deukhee Lee, Akira Nomiya, Akira Ishikawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yoichiro Matsumoto, Yukio Homma, and Mamoru Mitsuishi, "Problems and solutions associated with visual motion tracking using ultrasound images," *12th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU2012)*, 2012.6.10-13, Heidelberg Congress Center, Heidelberg, Germany.
 13. **Norihiro Koizumi**, Joonho Seo, Deukhee Lee, Akira Nomiya, Shin Yoshizawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yoichiro Matsumoto, Yukio Homma, and Mamoru Mitsuishi, "Robust Kidney Stone Tracking for a Non-invasive Ultrasound Theragnostic System-Servoing Performance and Safety Enhancement-," *2011 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA2011)* , pp.2443-2450, 2011.5.9-13, Shanghai International Conference Center, Shanghai, China (DOI: [10.1109/ICRA.2011.5980441](https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980441)).
 14. Makoto Tomida, **Norihiro Koizumi**, Hongen Liao, Etsuko Kobayashi, and Ichiro Sakuma, " Real-time monitoring and compensation of breast cancer on ultrasound image for ultrasound guided HIFU irradiation," *11th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU2011)*, 2011.4.11-13, New York, USA.

15. **Norihiro Koizumi**, Joonho Seo, Deukhee Lee, Akira Nomiya, Shin Yoshizawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yoichiro Matsumoto, Yukio Homma, and Mamoru Mitsuishi, "Development of a Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System -Technologizing and Digitalization of Medical Diagnostic and Therapeutic Skills-," *11th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU 2011)*, 2011.4.11-13, New York, USA.
16. Takakazu Funamoto, **Norihiro Koizumi**, Joonho Seo, Akira Nomiya, Shin Yoshizawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yoichiro Matsumoto, Yukio Homma, and Mamoru Mitsuishi, "Robustness Enhancement for Motion Compensation of a Non-invasive Ultrasound Theragnostic System," *11th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU2011)*, 2011.4.11-13, New York, USA.
17. Joonho Seo, **Norihiro Koizumi**, Deukhee Lee, Akira Nomiya, Shin Yoshizawa, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yoichiro Matsumoto, Yukio Homma, and Mamoru Mitsuishi, "Respiratory Motion Compensation by Coagulated Lesion Tracking for US-guided Robotic HIFU System," *11th International Symposium on Therapeutic Ultrasound (ISTU2011)*, 2011.4.11-13, New York, USA.

〔図書〕(計2件)

1. **Norihiro Koizumi**, Kouhei Oota, Akira Nomiya, Hiroyuki Tsukihara, Kiyoshi Yoshinaka, Takashi Azuma, Naohiko Sugita, Yukio Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "A Mechanical System Identification Method for Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System," *in Procedia CIRP -First CIRP Conference on BioManufacturing (BioM2013)-*, Mamoru Mitsuishi and Paolo Bartolo (Eds) Vol.5, pp.315-320, 2013, (DOI: [10.1016/j.procir.2013.01.062](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.062)).
2. **Norihiro Koizumi**, Yutaro Itagaki, Takakazu Funamoto, Hiroyuki Tsukihara, Akira Nomiya, Kiyoshi Yoshinaka, Naohiko Sugita, Yukio

Homma, Yoichiro Matsumoto, and Mamoru Mitsuishi, "Construction Methodology for the Non-Invasive Ultrasound Theragnostic System (4th report) - Bed-Type Servoing System for Body Targets -," *in Procedia CIRP -First CIRP Conference on BioManufacturing (BioM2013)-*, Mamoru Mitsuishi and Paolo Bartolo (Eds) Vol.5, pp.294-299, 2013, (DOI: [10.1016/j.procir.2013.01.058](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.058)).

〔産業財産権〕
出願状況(計4件)

[1] 名称：超音波治療システム
発明者：佐久間一郎, 小泉憲裕, 廖 洪恩, 小林英津子, 富田 誠, 藤原圭祐, 射谷和徳
権利者：東京大学, 日立アロカメディカル
種類：特願
番号：2012-017499
出願年月日：2012.1.31
国内外の別：国内

[2] 名称：超音波診断システム
発明者：窪田直人, 小泉憲裕, 廖 洪恩, 浅野岳晴, 湯橋一仁, 周 遊, 光石 衛, 大西真, 射谷和徳, 三竹 毅, 佐久間一郎, 門脇孝
権利者：東京大学, 日立アロカメディカル
種類：特許
番号：5368615
出願年月日：2012.8.9
国内外の別：国内

[3] 名称：超音波診断システム
発明者：窪田直人, 浅野岳晴, 小泉憲裕, 廖 洪恩, 湯橋一仁, 周 遊, 光石 衛, 大西真, 射谷和徳, 三竹 毅, 佐久間一郎, 門脇孝
権利者：東京大学, 日立アロカメディカル
種類：PCT 出願
番号：PCT/JP2013/066915
出願年月日：2013.7.23
国内外の別：国外

[4] 名称：生体内運動追跡装置
発明者：小泉憲裕, 李 東俊, 藤井達也, 福田浩之, 月原弘之, 東 隆, 杉田直彦, 宮寄英世, 本間之夫, 沼田和司, 松本洋一郎, 光石 衛
権利者：東京大学
種類：特願
番号：2015-040453
出願年月日：2015.3.2
国内外の別：国内

取得状況(計1件)

名称：超音波診断システム
発明者：窪田直人，小泉憲裕，廖 洪恩，浅野岳晴，湯橋一仁，周 遊，光石 衛，大西真，射谷和徳，三竹 毅，佐久間一郎，門脇孝
権利者：東京大学，日立アロカメディカル
種類：特許
番号：5368615
出願年月日：2012.8.9
取得年月日：2013.9.20
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

小泉憲裕の研究ブログ：

<http://blog2009nkoizumi.japanprize.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

小泉憲裕 (KOIZUMI, Norihiro)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師

研究者番号：10396765

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし