

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：53801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16341

研究課題名(和文)メンタルローテーション能力を再現する創発的医療支援ロボットシステムの構築

研究課題名(英文)Construction of emergent medical support robot system to reproduce the mental rotation ability

研究代表者

青木 悠祐 (Aoki, Yusuke)

沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号：70584259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、患者のみならず医師・検査技師の肉体的・精神的負担を軽減する創発的医療支援ロボットシステムの実現に向けて、側臥位診断に対応可能なシリアルリンク型超音波診断・治療補助ロボットを開発した。次に、医師・検査技師が潜在的に持っているプローブ走査のコツを解析し、メンタルローテーション能力として定義、定量的に示すことで検査者負担軽減のための支援システムの可能性が示唆された。そして、検査者がロボットと協調動作する際に、意図したプローブ走査の方向・大きさを計測する意図推定行列を提案し、算出実験を行った。これにより、ロボットと検査者の位置関係によらず、検査者のプローブ走査の意図の推定に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a serial link type Robotic-echography for Diagnosis and Treatment System that can cope with lateral position diagnosis. Next, we evaluated the mental rotation ability potentially possessed by physicians and laboratory technicians in ultrasound diagnosis. Analyzing tips peculiar to experts and quantitatively indicating the mental rotation ability will lead to problems of inexperienced people and support for reducing the burden on doctors. Next, when the experimenter cooperated with the robot, an experiment was conducted to calculate an intention estimation matrix that measures the direction and size of the probe scan intended by the inspector. As a result, regardless of the positional relationship between the robot and the experimenter, we succeeded in estimating the intention of the probe scan of the experimenter.

研究分野：医療ロボティクス

キーワード：超音波診断・治療補助ロボット メンタルローテーション能力 意図推定 協調動作 生体信号解析  
超音波断層像処理

### 1. 研究開始当初の背景

我が国が抱える医療の問題には、超高齢化社会の到来や医師の局在化、患者の大病院集中などが挙げられ、医師の負担を軽減する診断支援システムの開発が求められている。様々な画像診断の中でも超音波診断は低侵襲で、患者に対する負担が小さく、装置が小型・安価、画像取得の自由度が高いという利点がある。しかしその反面、超音波プローブ(以下プローブ)の走査には専門的な知識や経験的な探査手技が必要となり、目的の断層像取得とそれからの情報抽出が検査者に依存するという問題がある。そのため、プローブ走査をロボットが補助することによる検査支援システムが注目され、国内外問わず数多く報告されてきた。一方、造影超音波診断をはじめ、通常の検査において医師/検査技師は、プローブを体表に押し当てたまま所望の断層像を探索し、検出後は決められた時間ごとに断層像を維持し続けながら断層像の評価を行わなければならない、その際の負担は大きいことが知られており支援システムの開発が望まれている。

このような背景のもと、申請者は当該研究に関連して、胸部・腹部を対象としたパラレルリンク型、様々な患者体位に対応可能なリンク可変式シリアルリンク型ロボットを開発し、プローブの接触部位に応じて適切な反力を維持したまま体表面上をなぞり走査する位置と力のハイブリッド制御、力サーボ/ビジュアルサーボ切り替え制御を提案してきた。これにより、ロボットに取り付けられたプローブを操作者が通常検査時と同様に走査することが可能となっただけでなく、目的の臓器を検出後、プローブから手を離しても断層像処理結果をロボット制御にフィードバックすることで、被験者の呼吸や体動によらず、常に断層像中心に目的の部位を描出し続けることを実現した。同時に、生体信号・熟練手技解析システム構築し、超音波診断時の検査者の肉体的・精神的疲労の計測・解析が可能となった。

### 2. 研究の目的

上記の背景および成果をもとに、本研究では超音波診断において医師・検査技師が実現している「どの位置にプローブを当てるとどんな断層像が得られる」「この位置から次の検査部位を抽出するにはプローブをどのように動かせばよい」といったメンタルローテーション能力のロボットによる再現を行う。これにより患者側支援のみならず、本研究が進めてきた医師側支援も可能とし、患者のための支援が結果として医師側の支援につながる、またその逆も起こりうるような創発環境の構築を大きな狙いとする。

### 3. 研究の方法

本研究では検査者・被験者双方の診断支援を可能とする創発的医療支援ロボットシス

テムを構築する。具体的には以下の3つのテーマを遂行する。

- (i) 様々な体位の検査を可能とする医療支援ロボットシステムの構築
- (ii) メンタルローテーション能力・生体信号変化に基づいた疲労計測
- (iii) ロボットによるプローブ走査支援のための制御系構築による検査者の負担軽減可能性の検証

### 4. 研究成果

#### (a) シリアルリンク型超音波診断・治療補助ロボット ReDAT の開発

先行研究にて開発したロボットはベッド面を覆う形状をしているという点で共通している。これは、これらの研究が当初遠隔走査支援のみを考えており、救急車やドクターヘリなど、狭い環境においてストレッチャーやベッド面に設置することを想定していたからである。しかしこれらのロボットで協調動作を行う場合、きき腕1本で行う検査と状況が異なるため、協調動作のための力制御に必要な制御パラメータが一意に定まらず、またプローブの可動範囲を拘束してしまうため、操作者に違和感を与えるという問題点を抱えていた。そこで新たに、シリアルリンク型ロボットシステムを構築した。図1に超音波診断・治療補助ロボット(Robotic echography for Diagnosis and Treatment Support System, 以下 ReDAT)の外観を示す。

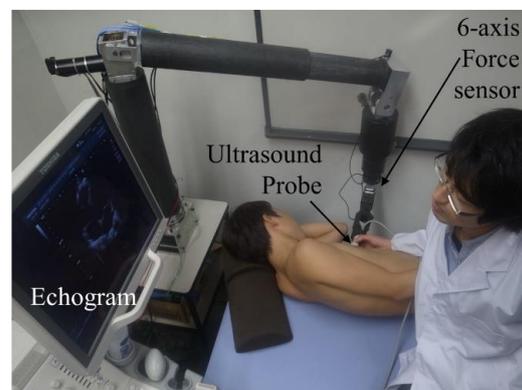


図1 超音波診断・治療補助ロボット ReDAT

ReDAT は6軸10自由度を持つシリアルリンク型ロボットとなっており、医師・検査技師が利き腕一本でのプローブ走査が可能となっている。本ロボットの特徴として、ロボットの筐体にCFRP複合材を用いることでアルミを用いた場合よりも軽量・高強度なロボットを実現したこと、そして関連研究にて対応を想定していなかった側臥位診断への適応が挙げられ、診断の際、ベッド上面に設置されたロボットにより患者体位が側臥位の場合においても、プローブ先端位置が所望の診断部位に到達可能なシステムとなっている。人とロボットの協調動作のための制御系として構築したブロック線図を図2に示す。

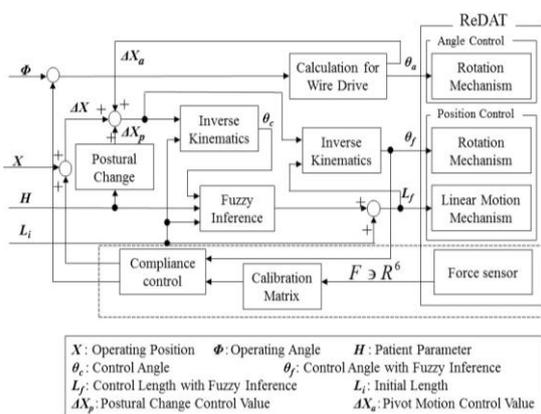


図2 ReDATの制御ブロック図

本システムの特徴は、検査者がプローブを走査する際の反力を指令値とし、コンプライアンス制御によりプローブの目標位置・姿勢角を算出し並進・回転・ピボット動作を行うように、ロボットの各関節角及び姿勢制御機構部のモータに回転角を与えることにある。

ReDATによる支援機能は3つに大別される。1つ目は、プローブ走査における検査者とロボットの協調動作である。この協調動作にはロボット先端部に取り付けられた6軸力センサ (NANO1.2/1-A-R, BLオートテック社) を使用し、検査者はロボットに取り付けられたプローブを把持し力を加えることで通常の診断時と同様にプローブ走査を行うことが可能である。

2つ目の機能は、ロボットによるプローブの位置・姿勢および断層像維持である。検査者は協調動作により通常の診断同様に所望の断層像を取得後、プローブから手を離すことでロボットが検査者の代わりにプローブの位置・姿勢を維持しながら断層像の取得状態を維持することが可能である。これによりプローブの位置・姿勢を検査者が直接維持する必要がなく、直接的な肉体的負担軽減へとつながる。

そして3つ目の機能は未熟検査者のプローブ走査支援である。この機能はロボットにより理想的な走査手技となるように、未熟検査者が把持するプローブを誘導することで未熟検査者のプローブ走査の上達を促すものである。

しかし、ReDATと検査者が協調しながらプローブ走査を行う際、検査者が意図した方向と力センサが実際に検出する値に誤差が生じる問題が起こりうる。この問題を解決するために、後述する検査者の意図推定を行う。また診断中、体動や呼吸によって臓器の位置が変化することに対応するためには断層像変化に対応した制御系を構築しなければならない。検査者がプローブを把持し、特定の周期を持つ断層像変化に対応するためには、断層像変化に対してプローブをどのように走査すればよいか、この点を理解する必要がある。そこで次節にて述べるメンタルローテーション能力の解析を行う。

(b) メンタルローテーション能力の定量化

まず、超音波診断におけるプローブ位置・姿勢計測および精神的・肉体的疲労を計測するためのシステムを構築した。プローブ位置・姿勢計測には GigE カメラを用いた DLT(Direct Linear Transformation method)3次元計測法を導入し、計測系を構築した。また、肉体的疲労の計測には表面筋電センサ (ID3PADW & IW2PADW, 追坂電子機器) を使用し、腕や肩などの負荷が大きいと予測される部位の筋電図の変化を解析することで疲労を、精神的ストレスの計測にはワイヤレス脳波計 (EPOC, Emotiv Systems Inc.) を使用し、脳波の変化を解析することでストレスを計測している。

構築したシステムを用いて、熟練・未熟検査者による健常者1名 (20y.o., male) を対象とした左心室長軸像・短軸像・心尖部四腔断面を撮像する傍胸骨アプローチ計測実験を行った。プローブ位置・姿勢を計測し、診断風景・断層像とあわせて3次元空間上に可視化したものを図3に示す。

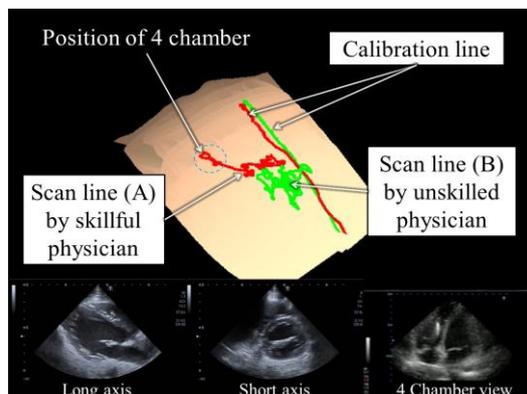


図3 プローブ走査軌跡の可視化

図中(A)は熟練検査者、(B)は未熟検査者のアプローチの一例であり、両者を比較すると、(A)熟練検査者は無駄な動きが少なく四腔断面まで撮像が可能であるのに対し、(B)未熟検査者は走査に迷いがあり、最終的に四腔断面までの取得は行えていない。両者を比較すると(B)に示される未熟検査者はプローブ可動域が広く所望の断層像を探すために複雑な動きが多いのに対して、(A)に示される熟練検査者は全体において無駄な動きが少なく、若干のプローブの回転などで所望の断層像を撮像していることがわかった。また、一連の診断アプローチにおける時間も未熟検査者が左心室短軸像を約 20[s]かけて撮像するまでに熟練検査者は心尖部四腔断面像までを約 15[s]程度の時間で撮像しており、未熟検査者と比較して熟練検査者の方が短時間であることも確認できた。このように写真や文章などではプローブ位置・姿勢が判断しにくい超音波診断アプローチ手法でもプローブ位置・姿勢情報を計測し3次元的に表示することによりプローブ走査手技のコツやクセ、体

表面とプローブ走査軌跡の関係が容易に判断可能となった。

検査者が所望の断層像撮像に必要としているのは、医学的な知見と経験的な探査手技である。この2つのコツから人体のどの位置にどのような形で臓器が配置されているのか、プローブをどのように動かせば所望の断層像が撮像できるのかを導き出している。本研究ではこのような空間把握の仕組みをメンタルローテーションと定義している。すなわち物体が回転や移動した場合にどのような形になるのかをイメージすることであり、超音波診断では、臓器の位置や撮像断面を頭の中にイメージすることを指す。また、この際のイメージを定量化する指標をメンタルローテーション能力と定義する。メンタルローテーション能力の定量化にあたり、本研究では断層像変化に着目し、プローブ移動量と断層像移動量を関係付ける変換行列をメンタルローテーション行列と定義した。メンタルローテーション行列を推定するための各座標系の変換の流れを図4に示す。

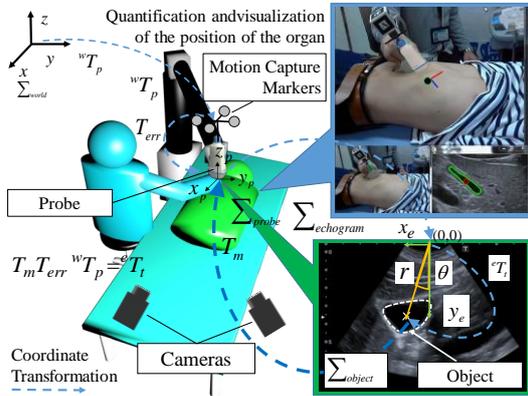


図4 超音波診断におけるメンタルローテーション能力の定量化のための座標変換

メンタルローテーション行列は、モーションキャプチャシステムによって取得した絶対座標系  $\Sigma_{world}$  におけるプローブ位置・姿勢とプローブ座標系  $\Sigma_{probe}$  におけるプローブの移動量、オブジェクト座標系  $\Sigma_{object}$  における臓器の移動量の相互関係を示す行列である。この行列を計算することにより、プローブ走査のコツの解析が可能となる。更に、図4に示すように所望の断層像を維持するために、プローブ情報と断層像情報を重畳し可視化することで臓器の移動に対してプローブの動きを決定しやすくなる。今後は、メンタルローテーション行列が、診断手技の中でどのような変換の意味を持っているのかを検証すると共に、その能力を診断支援ロボットに反映することで熟練者固有の手技を再現できる診断支援システムを構築していく。

(c) 検査者プローブ走査における意図推定  
検査者とロボットによる協調動作を行う際、ロボットに取り付けられた力覚センサが

検出する大きさ・方向に応じて力制御系を構築することでロボットは検査者の意図した方向に駆動することは言うまでもない。しかしながら、この際の力センサ出力を見ても、検査者がどのような意図をもって力を加えたのか、その特徴を読み取ることは難しい。例えば図5に示すように仰臥位診断時において、ロボットがベッド左側面に設置されている状況を標準として、ロボット座標系  $\Sigma_{Robot}$  と力センサ座標系  $\Sigma_{Force}$  と検査者座標系  $\Sigma_{Experimenter}$  を一致するように設定した場合、検査者自身から見てプローブを右側、すなわち  $x$  軸方向に駆動すると力センサも  $x$  軸方向の力を検出することができる。しかし、図中右上に示すように側臥位診断になった場合や、図中右下に示すようにロボットの設置位置や、検査者座位が変わった場合には、これらの座標系が変化してしまう。そのため、検査者が思い描く方向に力を入れ、プローブを動かそうとした際に、意図した方向に力センサの値が検出されるような変換行列の構築を行う必要がある。

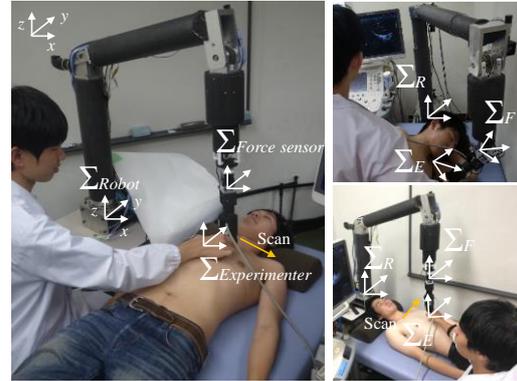


図5 ロボット設置位置、検査者姿勢、被検査者体位による座標系の変化

検査者の意図した方向の力・モーメントを  $M_F$  (Mental Force Index) とすると、 $M_F (\in R^6)$  は以下のように定義できる。 $M_F$  の各列が検査者の意図した力・モーメントの各方向成分の特徴量、各行が時系列データとなる。

$$M_F = \begin{bmatrix} M_{Fx_1} & M_{Fy_1} & M_{Fz_1} & M_{Mx_1} & M_{My_1} & M_{Mz_1} \\ M_{Fx_2} & M_{Fy_2} & M_{Fz_2} & M_{Mx_2} & M_{My_2} & M_{Mz_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{Fx_n} & M_{Fy_n} & M_{Fz_n} & M_{Mx_n} & M_{My_n} & M_{Mz_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

この  $M_F$  を推定するには、力センサ  $F (\in R^6)$  に意図推定行列  $I_{IM}$  (Intention Inference Matrix) をかけることで求めることができる。

$$M_F^T = I_{IM} F^T \quad (2)$$

なお  $I_{IM}$  は 6 行 6 列で与えられる。 $I_{IM}$  を推定するために、検査者の意図として既知の意図した動き  $C_{MF}$  (Calibration Mental Force) を用いる。式(2)を変形し擬似逆行列を用いることで式(3)に示す意図推定行列を算出する。

$$I_{IM} = C_{MF}^T (F \cdot F^T)^{-1} F \quad (3)$$

ここで  $C_{MF}$  の算出方法について述べる. 図 6 上に示すのはロボット先端を固定し, 十字操作を行った際の力センサ出力である. このとき, 各軸方向の力センサ出力  $F_x, F_y, F_z$  に対して, それぞれその最大値に対する割合を算出し, 二乗和平方根を求める. そして操作エリアに応じて符号を付加し,  $C_{MF}$  とする. センサデータに対して  $C_{MF}$  を算出した結果を図 6 下に示す. このように既知の意図を求めることができる.

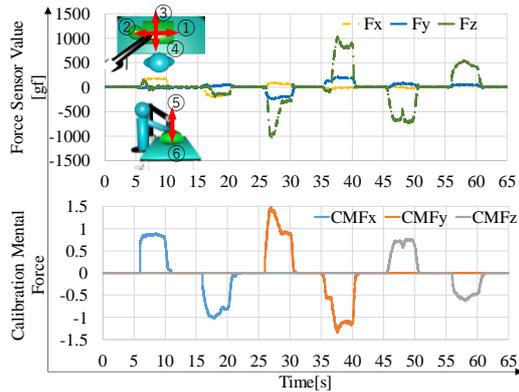


図 6 力センサ出力と意図推定行列による変換

前述の意図推定行列を用いて, 実際にロボットと検査者が協調動作する際の意図推定行列を算出する実験を行った. 検査者がプローブを把持した状態で  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸それぞれに + 方向, - 方向と十字操作した際の力センサ出力とその出力に意図推定行列を乗算した Intention Index [-] を図 7 に示す.

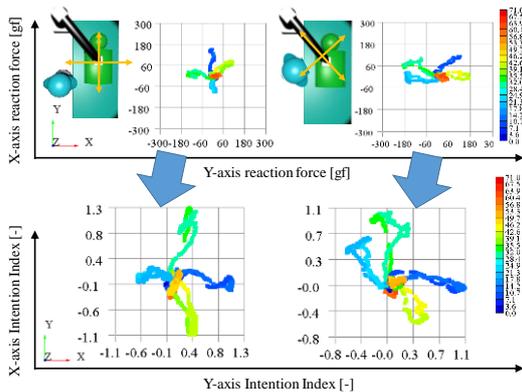


図 7 ロボットとの位置関係による意図推定

ベッド面に対して検査者が平行に座った場合と斜め 45 度に座った場合の 2 パターンで検査者座標系において十字操作した. 力センサ出力は絶対座標系において出力されるため検査者とロボットの位置関係を考慮できないのに対して, 意図推定することによって検査者座標系による検査者の意図を可視化することに成功し, 協調動作時の検査者から見た意図を計測できるようになった. これによりロボットと検査者の位置関係によら

ない, 検査者に合わせた支援システムの構築が可能となった.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- [1] 青木悠祐: 「メンタルローテーション能力を再現する超音波診断支援ロボットシステム」, 超音波医学, Vol.45, No.2, pp.139-148, 2018. 査読有  
<https://doi.org/10.3179/jjmu.JJMU.R.120>
- [2] 青木悠祐: 「メンタルローテーション能力を再現する創発的医療支援ロボットシステムの構築」, 地域ケアリング, Vol.18, No.1, pp.90-93, 2016.

[学会発表] (計 26 件)

- [1] 青木悠祐, 瀬戸翔太, 大山拓真, 赤池郁也, 吉村大地: 「メンタルローテーション能力を支援する超音波診断・治療補助ロボットシステムの構築」, 第 22 回ロボティクスシンポジウム in ISOBE 予稿集, pp.9-15, 2017. 査読有
- [2] 臼井達也, 大山拓真, 青木悠祐: 「超音波断層像処理を用いた呼吸による臓器の 3 次元移動範囲推定」, 第 23 回高専シンポジウム in 神戸講演要旨集, PDF, J-07, 2018..
- [3] 部谷若菜, 赤池郁也, 青木悠祐: 「超音波診断支援のための音響窓可視化システムの構築」, 第 23 回高専シンポジウム in 神戸講演要旨集, PDF, J-08, 2018.
- [4] 大山拓真, 臼井達也, 青木悠祐: 「呼吸による超音波断層像横断面移動へのプローブ追従アプローチ方法の検討」, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, USB, 3A2-10, 2017.
- [5] 吉村大地, 永田健太, 青木悠祐: 「生体信号解析に基づいた超音波診断支援のための検査者疲労計測」, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, USB, 3A2-11, 2017.
- [6] 赤池郁也, 部谷若菜, 青木悠祐: 「超音波診断における音響窓取得のためのプローブ接触位置・姿勢計測」, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, USB, 3B5-05, 2017.
- [7] 高橋元太, 田中哲太, 青木悠祐: 「超音波診断・治療補助ロボットによる検査者との協調動作のための操作力キャリブレーション」, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, USB, 3B5-06, 2017.
- [8] 臼井達也, 大山拓真, 青木悠祐: 「呼吸による臓器変位を補償する超音波断層像処理システムの構築」, 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア 2017 予稿集, p.6, 2017.

- [9] 部谷若菜, 赤池郁也, 青木悠祐:「音響窓取得を可能とする超音波プローブ可動域計測シミュレーション」, 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア 2017 予稿集, p.7, 2017.
- [10] 大石征裕, 瀬戸翔太, 青木悠祐:「超音波診断・治療補助ロボット ReDAT による検査者負担軽減のための意図推定」, 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア 2016 予稿集, p.8, 2017.
- [11] 吉村大地, 高橋元太, 青木悠祐:「生体信号解析に基づいた超音波診断におけるプローブ走査時の検査者の意図推定」, 第 59 回自動制御連合講演会講演論文集, USB, ThD3-4, 2016.
- [12] 大山拓真, 青木悠祐:「超音波診断支援システムにおける体動補償を目的とした断層像処理システムの構築」, 第 59 回自動制御連合講演会講演論文集, USB, FrA3-3, 2016.
- [13] 赤池郁也, 青木悠祐:「超音波診断におけるメンタルローテーション能力計測のための変換行列の決定」, 第 59 回自動制御連合講演会講演論文集, USB, FrA3-4, 2016.
- [14] 瀬戸翔太, 大石征裕, 青木悠祐:「超音波診断・治療補助ロボット ReDAT による検査者意図推定に基づく協調動作」, 第 59 回自動制御連合講演会講演論文集, USB, ThD3-3, 2016.
- [15] 瀬戸翔太, 大石征裕, 青木悠祐:「ロボットによる超音波診断支援のための検査者意図推定」, 第 22 回日本高専学会年会講演会講演論文集, DVD-ROM, P237, 2016.
- [16] 大山拓真, 赤池郁也, 佐野徳美, 青木悠祐:「超音波診断支援システムのための 3 次元追従ビジュアルフィードバック系の構築」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, DVD-ROM, 1A2-02a7, 2016.
- [17] 赤池郁也, 瀬戸翔太, 五十嵐雄介, 田中優斗, 青木悠祐:「超音波診断・治療補助ロボット ReDAT による力制御のための検査者意図推定」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama, DVD-ROM, 1A2-02a3, 2016.
- [18] 大山拓真, 佐野徳美, 青木悠祐:「臓器トラッキングのための超音波断層像処理に基づくビジュアルフィードバック系の構築」, 第 21 回高専シンポジウム in 香川講演要旨集, PDF, I-12, 2016.
- [19] 五十嵐雄介, 瀬戸翔太, 田中優斗, 青木悠祐:「超音波診断・治療補助ロボット ReDAT による協調動作のための検査者の意図推定」, 第 21 回高専シンポジウム in 香川講演要旨集, PDF, G-01, 2016.
- [20] 赤池郁也, 佐野徳美, 鈴木克真, 青木悠祐:「超音波診断におけるプローブ走査時のメンタルローテーション能力の評

価」, 第 21 回高専シンポジウム in 香川講演要旨集, PDF, I-11, 2016.

- [21] 五十嵐雄介, 瀬戸翔太, 田中優斗, 青木悠祐:「ロボットによる超音波診断支援のための協調動作システムの構築」, 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア 2015 予稿集, p.6, 2015.
- [22] 赤池郁也, 佐野徳美, 青木悠祐:「超音波診断におけるメンタルローテーション能力の計測とロボット支援システムの提案」, 富士山麓アカデミック&サイエンスフェア 2015 予稿集, p.7, 2015.
- [23] 青木悠祐, 田中優斗, 佐野徳美, 鈴木克真, 遠藤祐太郎, 瀬戸翔太:「走査手技解析に基づいたロボットによる超音波診断・治療補助システムの構築」, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, USB, 2B2-6, 2015.
- [24] 佐野徳美, 鈴木克真, 青木悠祐:「超音波診断におけるメンタルローテーション能力の計測と評価」, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, CD-ROM, 2F2-4, 2015.
- [25] 遠藤祐太郎, 鈴木克真, 田中優斗, 青木悠祐:「生体信号処理に基づいた疲労要因分析と超音波診断支援システムの提案」, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, CD-ROM, 2F3-1, 2015.
- [26] 鈴木克真, 佐野徳美, 遠藤祐太郎, 青木悠祐:「超音波診断支援のための熟練手技解析に基づいた特徴量抽出」, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, CD-ROM, 2F3-5, 2015.

〔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〕特になし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

青木 悠祐 (AOKI, Yusuke)

沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号: 70584259

### (2)研究協力者

田中優斗 (TANAKA, Yuto)

遠藤祐太郎 (ENDO, Yutaro)

鈴木克真 (SUZUKI, Katsuma)

佐野徳美 (SANO, Tokumi)

瀬戸翔太 (SETO, Shota)

赤池郁也 (AKAIKE, Fumiya)

大山拓真 (OHYAMA, Takuma)

吉村大地 (YOSHIMURA, Daichi)

高橋元太 (TAKAHASHI, Genta)

部谷若菜 (TORIYA, Wakana)

臼井達也 (USUI, Tatsuya)

田中哲太 (TANAKA, Tetta)