

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680059

研究課題名(和文) 拡張内視鏡イメージング - 構造・力学特性を反映した三次元画像と実世界の融合

研究課題名(英文) Augmented endoscopic imaging - Mixed reality enhanced by three dimensional images reflecting structure and physical properties

研究代表者

中尾 恵 (Nakao, Megumi)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：10362526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、術野の狭さや臓器変形が処置に影響を与える高難易度の手術を対象として、術者に手術プロセスと臓器の内部構造、周辺の血管や神経等の透視イメージを提供する拡張内視鏡イメージング法を開発した。提案方法は術野映像をストリーミング処理し、術前に撮像された患者の三次元画像を手術プロセスに応じて補正して融合することで、術中の臓器に対する変形操作や骨組織に対する切削を反映した手術支援情報の提示を可能とする。手術支援システムの試作を通して、肝臓がん切除術や内視鏡下脊椎後方手術を想定した検証を行い、手術プロセスの進展に伴って出現する脈管構造や、切削予定量の変化の重畳可視化が達成されることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study developed a set of methods for generating augmented endoscopic images that visualize surgical procedures and internal structures of organs using image overlay techniques. The methods simulate or estimate intraoperative deformation of organs and cutting operation to bone structures, and perform information overlay through real-time processing of endoscopic images. We have developed a prototype surgical support system for liver resection surgery and for microendoscopic bone cutting procedures, and confirmed that time-varying local appearance of vascular structures and remains to be cut can be visualized as augmented images in real time.

研究分野：情報学

キーワード：医用画像処理 コンピュータ外科学 手術ナビゲーション 臓器変形 拡張現実感

### 1. 研究開始当初の背景

近年、内視鏡下手術に代表される先端医療技術の普及とその安全管理、手術時間の短縮と医師の負担減少などが患者と医師の双方のニーズとなっている。CTやMRIなどの撮像機器の進歩により、一人の患者から一回で数百枚の断層画像集合（以下、三次元医用画像）が取得される機会も増加し、診断だけでなく手術計画や術中ナビゲーションへの活用が試みられている。

術野に支援情報を重畳する拡張現実感（Augmented Reality, AR）の外科手術支援への応用は1990年代のHarvard大学とMITの共同研究による脳外科手術ナビゲーションの研究を草分けとして、国内外において多くの試みがなされてきた。術前に撮像された患者の三次元画像の一部を術野内に投影し、軟組織の裏側に隠れた血管や神経、患部の位置等を可視化することで、安全かつ効率的な手術の進行が可能になることが期待されている。多くの研究でARの外科手術への応用のイメージが与えられた一方で、実用レベルの画像生成には至っているものは少なく、現状のナビゲーション製品の多くは術具の先端位置を表示するに留まる等、提示情報が限定的であった。また学術研究においても、術前に撮像された三次元画像と手術時の患者の体との位置合わせ精度の向上に主眼がおかれてきており、拡張像の品質向上や可視化・レンダリング方法については十分な検討がなされていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、手術支援のための可視化・拡張像の生成に新たに着目し、術野の狭さや臓器変形が手術の成否に影響を与える高難易度の手術を対象として、術者に手術プロセスや臓器の内部構造、軟組織に隠れた血管や神経の透視イメージを提供する拡張内視鏡イメージング法を開発することを目的とした。提案方法は術野映像をストリーミング処

理し、術前に撮像された患者の三次元画像を手術プロセスに応じて補正して融合することで、術中の臓器に対する変形操作や骨組織に対する切削を反映した手術支援情報の提示を可能とする。

### 3. 研究の方法

カメラを通して観察できる内視鏡映像の一部を任意に透過させ、軟組織によって遮蔽された関心領域をあたかも透視しているかのような現実感の生成を目指し、初年度は患者個人の三次元画像上に臓器に対する変形・加工操作をシミュレート・可視化するアルゴリズムの開発に着手した。また、撮像対象の三次元構造を反映した視覚的に不整合のない透視イメージを、内視鏡映像と位置合わせされた三次元医用画像の両者から生成する方法及び計測システムについて検討した。

次年度では、三次元構造に加えて撮像対象の力学特性、特に手術時の臓器変形や硬組織の加工によって生じる変化に対応して拡張内視鏡像を生成する手法を開発した。また、時間変化する内視鏡映像の一部をストリーミング画像処理によって加工して拡張像を生成する方式を開発した。肝切除術では術前に切離面が計画されるが、実際の手術では臓器変形を考慮した切除が必要である。この変形を考慮した切離面を術野に支援情報として重畳可視化することによって、より精度の高い切離が可能となり、想定と異なる血管を傷つけるなどの事故を未然に防止できる枠組みの構築を目指した。

最終年度では、構築した理論・アルゴリズムと計測装置を統合した拡張内視鏡手術支援システムを試作した。患者実測データを適用した試用試験を通して提案アルゴリズムの妥当性を検証し、試作システムの有用性を評価した。

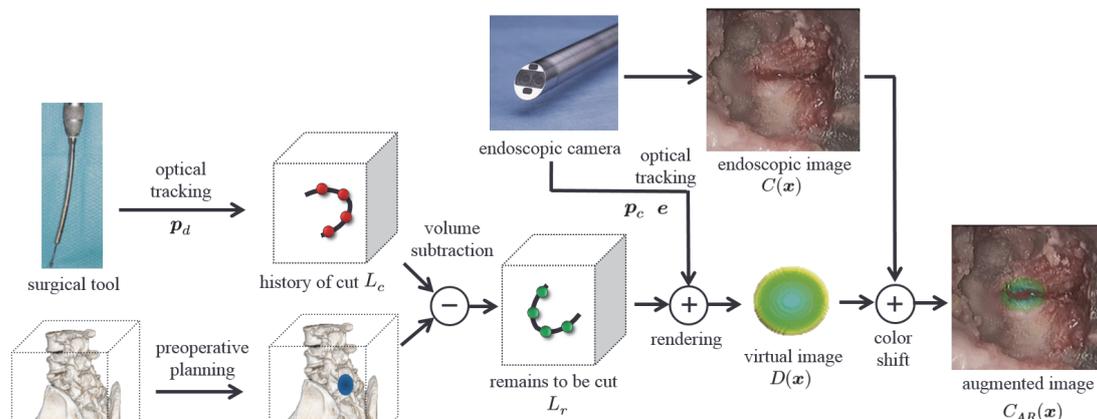


図1. 内視鏡下脊椎切削術における拡張内視鏡画像生成の流れ

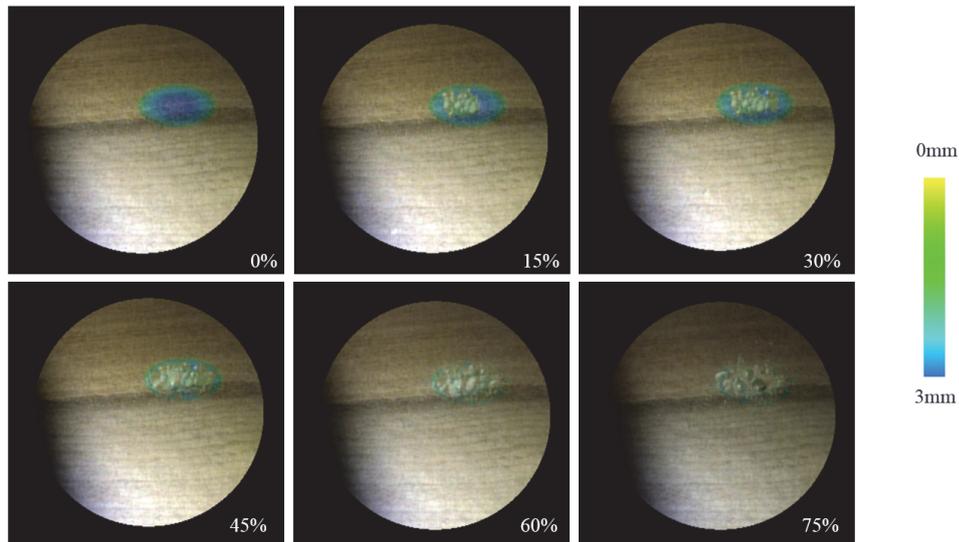


図 2. 切削の進行に伴う切削予定領域の重量可視化結果の推移

#### 4. 研究成果

初年度は、三次元画像に基づく手術プロセスの可視化と拡張内視鏡像の基礎理論の構築に取り組んだ。具体的な研究成果は以下の通りである。

##### (1) 撮像対象の三次元構造を反映した拡張内視鏡像生成法の開発

拡張像の生成時に三次元画像に含まれる構造情報を用いて実画像とレンダリング像を混合可視化する方式について研究を行った。神経や血管等、複雑な生体構造を含む内視鏡画像・医用画像に対応した拡張像生成法を開発した。

##### (2) 内視鏡及び術具の三次元位置・姿勢を反映した可視化システムの開発

手術時には内視鏡の角度や挿入量を頻繁に変更しつつ処置が行われる。この操作に同期して、術者が観察する内視鏡視野に対応した可視化結果を提示することで効果的なナビゲーションが可能となる。内視鏡の位置・姿勢情報をリアルタイムに計測し、可視化プログラム内のカメラを同期制御することによって手術対象の臓器を可視化するシステムを設計した。(図 1)

##### (3) 臓器変形・加工に対応した手術プロセス可視化法の開発

手術時に臓器に生じる変形や硬組織に対する切削などの一連の手術プロセスをシミュレートし、内視鏡のレンズ特性を反映してレンダリングする可視化アルゴリズムを開発した。(図 2) 臓器変形・加工シミュレーションには独自開発の医用グラフィクスライブラリを拡張した。

次年度は引き続き基礎理論の構築に従事

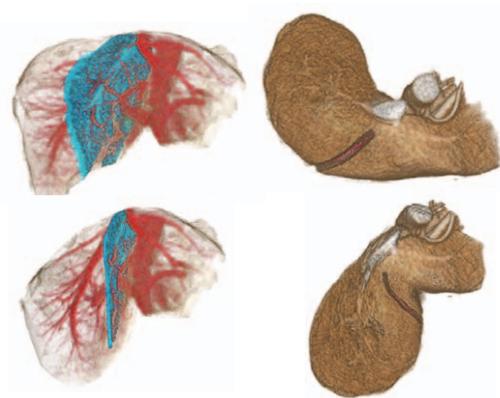


図 3. 肝臓に対する臓器変形操作が切離パスを与える影響の可視化

し、アルゴリズムの実装を通してテーマごとに検証を行った。

##### (4) 撮像対象の構造・力学特性を反映した拡張内視鏡像生成法の開発

初年度に開発した拡張内視鏡像生成アルゴリズムを拡張し、手術時の臓器に対する変形・加工操作によって生じる力学的な変化に対応して拡張内視鏡像を生成するアルゴリズムを開発した。(図 3)

##### (5) 内視鏡映像のストリーミング画像処理法の開発

内視鏡から随時得られる術野映像に対し、位置合わせされた三次元画像が持つ構造情報を参照することで深さ情報をバックグラウンドで重畳する。GPU (Graphics Processing Unit) 上での並列演算により動的に内視鏡画像をフィルタリングし、撮像対象の構造・位置関係を反映した拡張像を生成する方法を考案した。

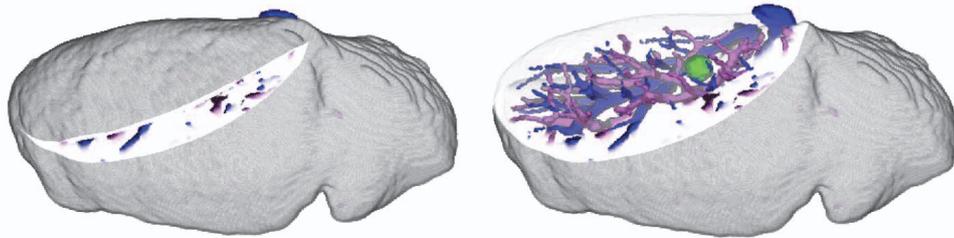


図 3. 患者個人の三次元 CT 画像を用いた臓器切除・変形を伴う肝切除プロセスのシミュレート結果

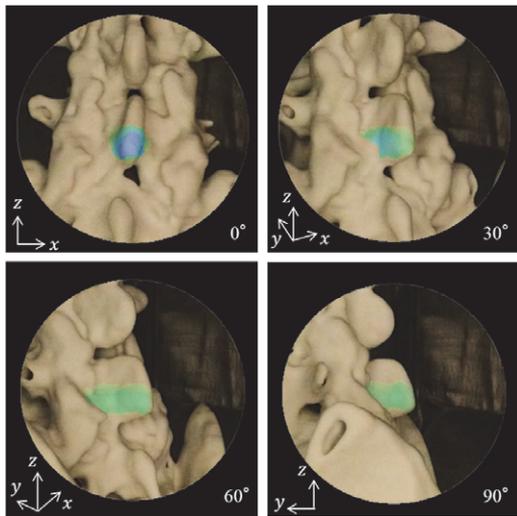


図 4. 椎骨の 3D プリンタモデルに対する切削予定領域の重量可視化結果

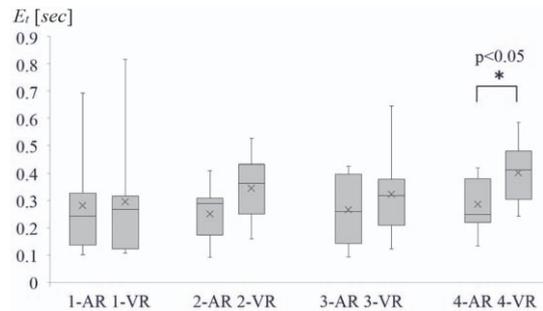
(6) 術中支援のためのジェスチャ入力インターフェースの開発

従来の接触型のポインティングデバイスや音声入力では手術中に術者がナビゲーション機器を効率的に操作することが難しかった。本研究ではジェスチャ入力に着目し、指や腕等の動作によって、拡張像を任意に操作・生成可能とするインターフェースを開発した。

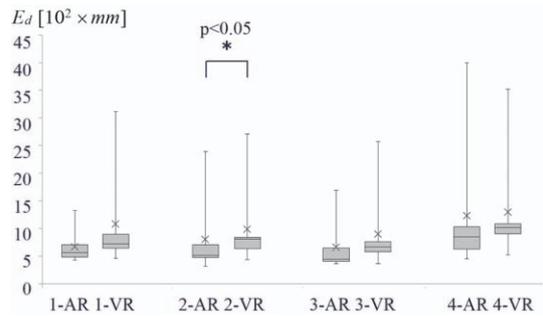
最終年度では、これまでに取り組んできた手術プロセス可視化、拡張像生成アルゴリズムを実装し、拡張内視鏡手術支援システムを試作した。また、症例データを複数適用して臨床現場への導入を想定した検証を行った。

(7) 拡張内視鏡手術支援システムの試作

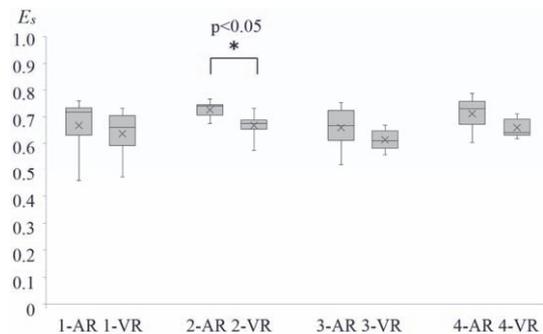
術具と内視鏡先端の位置及び姿勢をリアルタイムに計測し、その履歴情報に合わせて三次元画像を更新することによって、術中の臓器に対する変形操作や骨組織に対する切削を反映した手術支援情報の提示を可能とする試作システムを構築した。拡張内視鏡画像の生成過程において、内視鏡画像の画素値の局所的シフトを用いることによって、内視鏡画像の劣化を抑えた手術支援情報の提示を可能とした。



(a) 切削所要時間  $E_t$



(b) ルータ先端の総移動量  $E_d$



(c) 切削予定領域と切削済み領域の類似度  $E_s$

図 5. 切削支援における拡張内視鏡像の有効性：拡張内視鏡像(AR)とレンダリング像(VR)を用いた場合の (a) 切削所要時間, (b) ルータ先端移動量, (c) 切削予定領域と切削済み領域の類似度の比較

(8) 試作システムの評価実験

胆管膵・移植外科における肝臓がん切除術の計画及びナビゲーションを想定した検証を行い、三次元 CT 画像を用いて臓器変形を伴う術中の切離プロセスの進展に伴って出現する脈管構造の可視化を達成することを

確認した。(図3)

また、実験協力者の参加の下、整形外科における脊柱管狭窄症や椎間板ヘルニアに対する内視鏡下脊椎切削術を想定した評価実験を行った。開発システムを通じた切削完了までの残りの切削量の重畳可視化(図4)によって、従来のボリュームレンダリング像を用いた支援方法と比較して、切削に要する時間が短縮され、より正確な切削に繋がることを確認した。(図5)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] M. Nakao, M. Hosokawa, Y. Imai, N. Ueda, T. Hatanaka, T. Kirita and T. Matsuda, "Volumetric Fibular Transfer Planning with Shape-Based Indicators in Mandibular Reconstruction", IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 19, No.2, pp.581-589, Mar 2015.
- [2] M. Nakao, S. Takemoto, T. Sugiura, K. Sawada, R. Kawakami, T. Nemoto and T. Matsuda, "Interactive Visual Exploration of Overlapping Similar Structures for Three-dimensional Microscope Images", BMC Bioinformatics, 15:415, Dec 2014.
- [3] M. Nakao, K. Kurebayashi, T. Sugiura, T. Sato, K. Sawada, R. Kawakami, T. Nemoto, K. Minato and T. Matsuda, "Visualizing in vivo Brain Neural Structures Using Volume Rendered Feature Spaces", Computers in Biology and Medicine, Vol. 53, pp. 85-93, Oct 2014. (**Honored Paper**)
- [4] R. Haraguchi, M. Nakao, K. Kurosaki, M. Iwata, K. Nakazawa, K. Kagisaki and I. Shiraishi, "Heart Modeling of Congenital Heart Disease Based on Neonatal Echocardiographic Images", Advanced Medical Engineering, Vol. 3, pp.86-93, July 2014.
- [5] M. Nakao, Y. Oda, K. Taura, and K. Minato, "Direct Volume Manipulation for Visualizing Intraoperative Liver Resection Process", Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol. 113, No. 3, pp. 725-735, Mar 2014.
- [6] 益田 祐次, 原口 亮, 中尾 恵, 岩田 倫明, 黒寄 健一, 鍵崎 康治, 白石 公, 中沢 一雄, 湊 小太郎, "新生児心エコー画像に基づく先天性心疾患の3次元モデル構築支援システム", 生体医工学, Vol. 51, No. 2, pp 95-102, 2013.

[学会発表] (計 24 件)

- [1] 齋藤 陽, 中尾 恵, 浦西 友樹, 松田 哲也, "内視鏡手術支援のための多視点シルエット画像を用いた柔軟体の変形推定", 電子情報通信学会技術研究報告 医用画像(MI), Vol. 115, No. 25, May 2015. (発

表予定)

- [2] S. Aso, M. Nakao, K. Imanishi, Y. Imai, N. Ueda, T. Hatanaka, T. Kirita and T. Matsuda, "A Study on Semi-automatic Fibular Transfer Planning in Mandibular Reconstruction", Proc. Medical and Biological Imaging, p6, Mar 2015.
- [3] R. Sakata, M. Nakao, and T. Matsuda, "Estimation of External Forces Using Local Displacement of Elastic Body", Proc. Medical and Biological Imaging, p10, Mar 2015.
- [4] M. Nakao, K. Taura and T. Matsuda, "Resection Process Modeling Based on 3D Images", Proc. Medical and Biological Imaging, p11, Mar 2015.
- [5] 中尾 恵, "三次元画像に基づく手術プロセスの可視化と時系列分析", 第9回肝癌治療シミュレーション研究会 特別講演, Sep 2014.
- [6] 遠藤 翔大, 中尾 恵, 今西 勁峰, 木岡 雅彦, 吉田 宗人, 松田 哲也, "手術時の切削による形状変化を反映した重畳可視化法の提案", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33C-2, Sep 2014.
- [7] 妹尾 昌幸, 中尾 恵, 松田 哲也, "手指による実物体の押し込み操作を入力とする力学シミュレーションシステム", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 31D-4, Sep 2014.
- [8] 原口 亮, 黒寄 健一, 中尾 恵, 岩田 倫明, 鍵崎 康治, 白石 公, 中沢 一雄, "心血管構造の立体CGモデル作成システムにおける類似モデル検索手法", 第33回医療情報学連合大会, 1-C-2-4, Nov 2013.
- [9] 竹本 真太朗, 中尾 恵, 佐藤 哲大, 杉浦 忠男, 松田 哲也, "高次元特徴量空間を用いた対話的ボリューム可視化手法", 電子情報通信学会研究報告(MI), pp. 25-28, Nov 2013.
- [10] 大野 史敬, 中尾 恵, 松田 哲也, "視覚・触覚情報の倍率が弾性体操作に与える影響に関する基礎的検討", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 315-316, Sep 2013.
- [11] 今井 裕一郎, 中尾 恵, 細川 守, 上田 順宏, 畠中 利英, 柳生 貴裕, 青木 久美子, 山川 延広, 山中 康嗣, 湊 小太郎, 松田 哲也, 桐田 忠昭, 顎骨再建計画支援システムを利用したオトガイ部を含む下顎骨再建時の形態的特徴に基づく評価指標の検討, 第31回日本口腔腫瘍学会総会・学術大会, O-036, Jan 2013.
- [12] 益田 祐次, 原口 亮, 中尾 恵, 岩田 倫明, 黒寄 健一, 鍵崎 康治, 白石 公, 中沢 一雄, 湊 小太郎, "先天性心疾患の三次元モデル構築支援システム ~中隔欠損モデル編集インタフェース~", 電子情報通信学会技術報告(MI), p65-68, 2013.
- [13] M. Nakao, M. Hosokawa, Y. Imai, N. Ueda,

- T. Hatanaka, K. Minato, T. Kirita, T. Matsuda, "Volumetric Surgical Planning System for Fibular Transfer in Mandibular Reconstruction", Proc. IEEE EMBC, pp. 3367-3370, 2013.
- [14] F. Ohno, M. Nakao, T. Matsuda, "Finger Force and Position Measurement without Obstructing Touch Interaction", IEEE EMBC Poster, 2013.
- [15] S. Takemoto, M. Nakao, T. Sato, T. Sugiura, K. Minato, T. Matsuda, "Interactive Volume Visualization of Microscopic Images Using Feature Space Reduction", IEEE EMBC Poster, 2013.
- [16] S. Endo, M. Nakao, K. Imanishi, M. Yoshida, M. Kioka, K. Minato, T. Matsuda, "Intraoperative Image Generation Methods Reflecting Shape Changes in Bone Cutting Procedures", IEEE EMBC Poster, 2013
- [17] M. Nakao, K. Imanishi, M. Kioka, M. Yoshida, K. Minato and T. Matsuda, "Synchronized Visualization of Bone Cutting to Support Microendoscopic Discectomy", 19th International Display Workshop, INP6-4L, Dec 2012.
- [18] 上田 順宏, 今井 裕一郎, 中尾 恵, 畠中 利英, 山川 延宏, 山中 康嗣, 湊 小太郎, 桐田 忠昭, "当科における粉末固着積層造形法による 3D 造形モデルを用いた下顎再建の術前シミュレーションについての検討", 日本シミュレーション外科学会会誌, Vol. 20, No.3, pp. 80-81, Nov 2012.
- [19] 細川 守, 中尾 恵, 今井 裕一郎, 上田 順宏, 畠中 利英, 桐田 忠昭, 松田 哲也, "下顎骨再建術計画支援システムにおける形態的特徴に基づく評価指標の提案", 生体医工学シンポジウム, 1-5-03, Sep 2012.
- [20] 紅林 広亮, 中尾 恵, 杉浦 忠男, 佐藤 哲大, 澤田 和明, 川上 良介, 根本 知己, 湊 小太郎, "特徴量空間を用いた二光子顕微鏡画像のボリューム可視化", 生体医工学シンポジウム, 2-5-01, Sep 2012.
- [21] 益田 祐次, 原口 亮, 中尾 恵, 岩田 倫明, 黒寄 健一, 鍵崎 泰治, 中沢 一雄, 湊 小太郎, "新生児心エコー画像に基づく先天性心疾患の 3 次元モデル構築支援システム", 生体医工学シンポジウム, 4-1-09, Sep 2012.
- [22] 細川 守, 中尾 恵, 今井 裕一郎, 上田 順宏, 畠中 利英, 桐田 忠昭, 松田 哲也, "下顎骨再建術計画支援システムにおける形態的特徴に基づく評価指標", 第12回日本 VR 医学会学術大会, p18, Aug 2012.
- [23] 田浦 康二郎, 中尾 恵, 波多野 悦朗, 石井 隆道, 成田 匡大, 長田 博光, 黒田 知宏, 湊 小太郎, 上本 伸二, "Plissimo Era を用いた肝切除術の Virtual Reality", 第 67 回日本消化器外科学会総会, WS-3-1-6, Jul 2012.
- [24] 益田 祐次, 原口 亮, 中尾 恵, 黒寄 健

一, 鍵崎 康治, 中沢 一雄, 湊 小太郎, "新生児エコー画像に基づく先天性心疾患の形状モデル構築支援システム", 第 51 回日本生体医工学会大会, p.196, May 2012.

〔図書〕 (計 1 件)

- [1] 中尾 恵, 人体・臓器形態のバーチャル化～三次元画像に基づく手術工程のモデリング～, 日本バーチャルリアリティ学会学会誌 特集記事, pp. 155-159, 2013.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 医用画像表示装置, 医用画像表示方法, 及びプログラム  
 発明者: 中尾 恵, 竹村 知晃  
 権利者: 京都大学  
 種類: 特願  
 番号: 2015-49873  
 出願年月日: 平成 27 年 3 月 12 日  
 国内外の別: 国内

〔その他〕 ホームページ:

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~meg/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 恵 (Megumi NAKAO)  
 京都大学・情報学研究科・准教授  
 研究者番号: 10362526