

研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17100008
 研究課題名（和文） コンピュータ外科における次世代エンドエフェクタ
 及びナビゲーションシステムの開発
 研究課題名（英文） Development of Next Generation End Effector
 and Navigation System in Computer Aided Surgery
 研究代表者
 土肥 健純（DOHI TAKEYOSHI）
 東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
 研究者番号：20171944

研究成果の概要（和文）：本研究では次世代型低侵襲治療外科手術の実現を目指し、重要臓器を傷つけずに体内深部の患部にアクセスし最適な処置を行う「外科医の新しい手」となる次世代型高機能エンドエフェクタおよび、エンドエフェクタを患部へ安全・確実に誘導し、術中の処置および処置後の確認・診断を行うための「外科医の新しい目」となる次世代型ナビゲーションの開発を行った。また、これらの定量的評価と動物実験を通し有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：For next-generation minimal invasive surgery, we developed the novel end-effectors as “new hands” for safe approach and optimal procedure of deep-seated lesion, and novel navigation system as “new eyes” for safe and secure guidance of the end-effectors with intra- and post-operative diagnosis. We evaluated the developed technologies in in-vitro and in-vivo experiments to prove the feasibility.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	19,600,000	5,880,000	25,480,000
2006年度	18,700,000	5,610,000	24,310,000
2007年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2008年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2009年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
総計	69,600,000	20,880,000	90,480,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：①コンピュータ外科学 ②低侵襲治療システム ③医用ロボット ④医用・生体画像

1. 研究開始当初の背景

近年急速に普及し始めた外科領域における低侵襲治療を、今以上に進歩発展させて真の意味の21世紀型低侵襲外科治療を実現するためには、より高度な外科医の「新しい目」と「新しい手」の開発が必要である。現在では外科医が処置する動作を単に機械で行うマニピュレータや手術支援ロボットが研究

されている程度であるが、外科医が行う処置のマニピュレータや手術支援ロボットによる模倣は多くの場合外科医自身の処置に劣ることが多い。すなわち、機械的に処置するのであればその処置に適した機構があるはずであり、その機構を医工連携により開発する必要がある。

2. 研究の目的

重要臓器を避けながら患部にアクセスし、最適な処置を行うための外科医の新しい手となる次世代型の高機能エンドエフェクタ及び、エンドエフェクタを患部へ安全に誘導し、処置の術中・術後の診断と確認を行うための外科医の新しい目となる次世代型ナビゲーションを開発する。

3. 研究の方法

(1) Integral Videography (IV) 立体像と三次元超音波を用いた IV 表示システム

術中の変形にも対応できる手術誘導システムを目指し、Inter-modality 剛体レジストレーション及び Intra-modality 非剛体レジストレーション手法を開発し、各レジストレーションの要素となるプロセスを GPU 計算で行う。特に高画質かつリアルタイム IV 画像レンダリング用の画像処理エンジンを導入し、超音波画像と MRI 画像のレジストレーションによる四次元画像生成法の開発と評価、ナビゲーション技術への応用を行う。

また、手術中は術中の組織機能状態の画像診断を行うため、化学物質マーカ (5-ALA) による腫瘍の位置同定情報を、Integral Videography 三次元ディスプレイを用いて術者へと提示する。

(2) 可変視野内視鏡

臨床使用を想定し、内視鏡自体の移動を行うことなく、光学系のコントロールによって視野を変化させる内視鏡を考案する。小型化可能な構造を考案・開発し、画質の定量的評価、in vivo 実験を行う。

(3) 心拍動下心臓外科手術支援画像観察デバイス

心拍動下の血流のある状態で心腔内の画像観察が可能となるように、生体適合性の高い透明フラッシュ液をタイミングよく噴出し観察する手法を提案する。提案手法を採用した内視鏡デバイスを開発し、画質の定量的評価とブタを用いた in vivo 評価を行う。

(4) 心拍動下心臓外科手術支援クリッピングデバイス

僧帽弁の前尖と後尖の先端中央部を2つのクリップを用いてそれぞれクリッピングし、2つのクリップを結合させる手法の提案を行う。提案手法を採用した機構の実現・検証を行った後に、in vivo 評価を行う。

(5) 多自由度屈曲鉗子マニピュレータ

細径の2自由度屈曲機構を開発し、またエンドエフェクタ機能の拡大を行う。バイポーラ型電気メス多自由度屈曲鉗子マニピュレータの開発を行い、in vivo にて評価する。

(6) 体内深部局所小型 MRI コイル
小型 RF コイルを試作し、Open-MRI 内で局所の高解像度断層像の取得や臨床使用に適したコイルについて検討する。

4. 研究成果

(1) Integral Videography (IV) 立体像と三次元超音波を用いた IV 表示システム

術中の変形にも対応できる手術誘導システムを目指し、Inter-modality 剛体レジストレーション及び Intra-modality 非剛体レジストレーション手法を開発し、各レジストレーションの要素となるプロセスを GPU 計算で行う手法の提案・開発を行った。特に高画質かつリアルタイム IV 画像レンダリング用の画像処理エンジンを導入し、超音波画像と MRI 画像のレジストレーションによる四次元画像生成法の開発と評価を行った。これにより、リアルタイムに得られる超音波画像情報に、より解像度の高い術前の MRI 画像を対応させることが可能となり、より高画質な三次元立体像が得られるようになった。

また、心拍動下の心腔内手術の画像による支援を目指し、GPU 計算による実三次元 IV 画像のレンダリングおよびレジストレーションを大幅に高速化し、ほぼリアルタイムでの表示を可能とした。

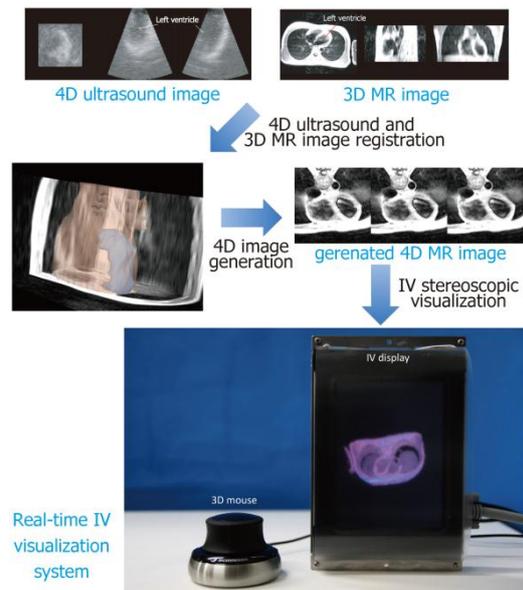


図1：心臓の4D超音波データと3DMRI画像の統合とリアルタイムIV立体表示

さらに高解像度大画面ディスプレイを用いて、高速画像作成アルゴリズムの開発と評価を行った。GPU 計算により IV 画像のリアルタイムレンダリング (1 フレーム/秒以上; 従来の最大9倍速) と、高精度レジストレーション (脛骨モデルにて誤差 1.7 ± 0.6 mm) を実現した。また、三次元超音波データを基にしたリアルタイム IV 表示を可能とした。

モデル	Tool	Head	Bone	Heart	Skull
					
要素数	8	22915	97119	169829	486674
従来手法	52±5	412±61	692±5	1158±38	1395±9
新規手法	6±0	45±0	85±1	321±6	408±0

図2: GPU計算によるIVレンダリング計算の高速化(各手法の単位はms).

患部の機能画像表示については、スペクトルを計測した箇所と病理診断を正確に比較する手法を提案し、ヒト脳腫瘍にて蛍光スペクトル分布を捕らえられることを確認した。さらにヒト脳腫瘍の蛍光スペクトル分布を脳の三次元モデルに重ね合わせ、IV画像として実三次元画像表示できることを確認した。

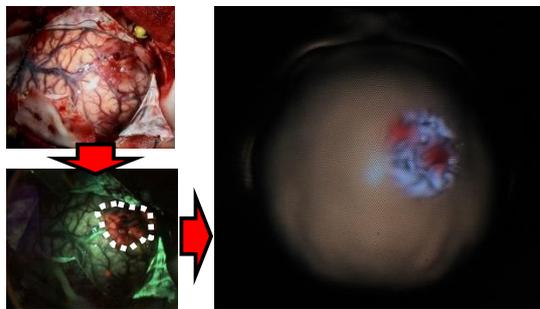


図3: 患部機能画像(脳腫瘍の蛍光(5-ALA)マーカー)の頭部IV立体表示への重ね合わせ

(2) 可変視野内視鏡

レンズやプリズム、ミラーによる光路変化やシャッタによる光路の切り替えを内視鏡周辺で行う原理を考案し、臨床使用を想定して小型化が可能な内部構造・機構を開発した。ウェッジプリズム型可変視野内視鏡の開発では、外径5.6mm(光源を含め外径10mm)の試作機を製作し視野角55degの内視鏡について片側19degの視野移動を行い、最大95degの視野角を実現した。1組の向かい合った偏光板を同軸回りに独立に回転することによる視野切り替え方法の実現および試作評価を行った。

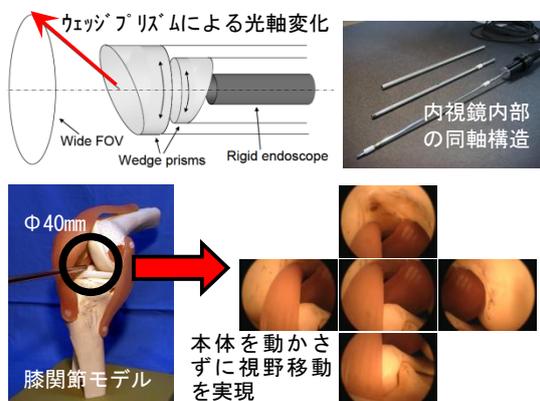


図4: ウェッジプリズム内視鏡による視野移動

偏光板ビームスプリッタ型可変視野内視鏡については、光源を含め外径7mmの臨床用試作機を開発した。また、画質・歪み等定量的な評価を行い、画質劣化が大きくないことを示し、直視と側視のスムーズな切り替えが可能であることを確認した。また、モータ駆動による直視/側視の切り替えを実現し、ブタ腹腔内観察での視野変更を円滑に行えることを確認した。

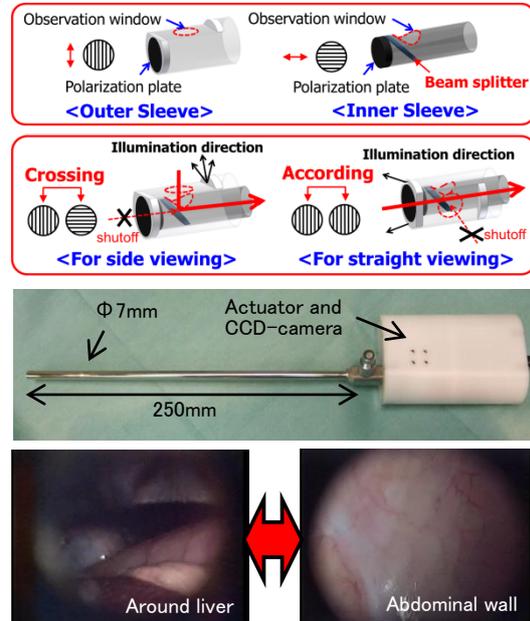


図5: ビームスプリッタ内視鏡による直視と側視の切り替え観察

さらに直視と側視、および直視と斜視の切り替えと立体視を両立させ、広い視野と奥行感覚の把握を実現した。

(3) 心拍動下心臓外科手術支援画像観察デバイス

血流・血液内での高画質画像を得る手段として、生体適合性の高い透明フラッシュ液をタイミングよく噴出し観察する血管内可視化を提案し、in-vitroにて評価実験を行った。その後、実際の心拍動下のブタ心臓内で可視化実験を行ない、右心房からのアプローチで、三尖弁の弁尖および心房中隔の観察を試みたところ、これまでは赤血球により視野が得られなかった心腔内での内視鏡画像を得た。

さらに内視鏡先端にはフラッシュ液と血液を明確に分離し整流する同軸のセパレータを搭載した。流体シミュレーションにより、フラッシュ液を噴出するノズル形状の最適化を行い、観察対象近傍でのフラッシュ液拡散を防止した。さらに心電との同期によるフラッシュ液噴出タイミングを制御し、ブタ拍動心内での三尖弁、心耳、腱索、乳頭筋および心室中隔のこれまでより長時間の観察を可能とした。

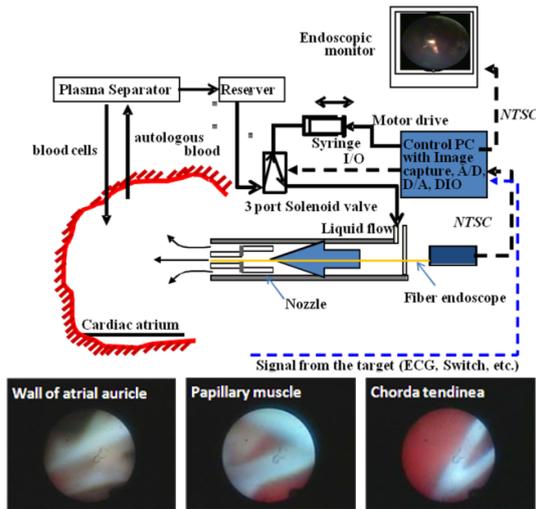


図6：上)フラッシュ液内視鏡のシステム構成. 下)ブタ拍動心内での内視鏡画像.

(4) 心拍動下心臓外科手術支援クリッピングデバイス

僧帽弁の前尖と後尖の先端中央部を2つのクリップを用いてクリッピングし、2つのクリップを結合させた。クリップにはV字型の金属板を塑性変形させることで弁尖を把持する方法を考案し試作を行った。クリッピング機構については、2×15mm(厚さ0.3mm)のクリップを屈曲させて弁尖をクリッピングし、その後に脱離する機能を組み込んだΦ6mmのデバイス開発を行った。In vivo 実験では、超音波画像誘導下でブタ拍動心内の弁尖をクリッピングできることを確認した。

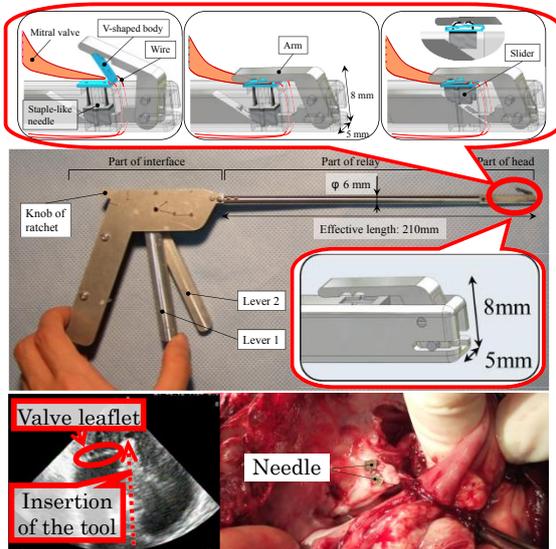


図7：上)クリッピングデバイスとクリッピング機構. 下)In vivo 実験でのブタ弁尖へのクリッピング.

(5) 多自由度屈曲鉗子マニピュレータ

最小で外径3.5mmまでのマニピュレータの細径化を達成した。外径3.5mmの場合、エンドエフェクタ用チャンネル径は0.8mmまで確

保でき、鉗子やレーザーファイバを交換可能に搭載できるようにした。2自由度屈曲の再現性は誤差±0.2mmと高く、最大2.57Nの屈曲力と3.48Nの把持力を有することを確認した。外径5mmまで拡張するとチャンネル径を1.3mmまで確保でき、より高機能のバイポーラ型電気メスの搭載が可能となり、ブタ in vivo 実験では組織と血管の凝固が可能であった。

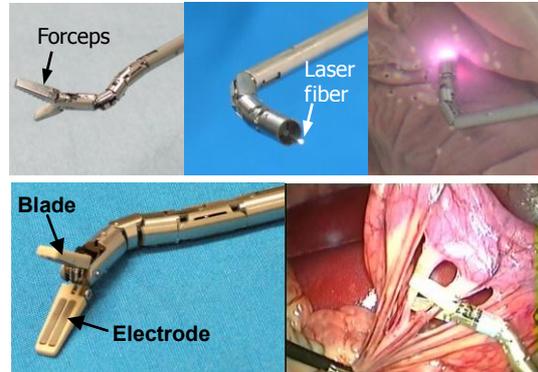


図8：上)3.5mm 鉗子・レーザーマニピュレータ. 下)5.0mm 電気メスバイポーラマニピュレータ.

さらに、軟性術具を体内深部の患部付近まで周辺の重要組織を傷つけずに誘導するための、柔剛を切り替え可能な空圧制御の外套管を開発した。ブタ腹腔内にて、従来の内視鏡では観察できない臓器の裏側や間隙へ外套管を挿入し、細径の軟性術具を体内深部まで安全に誘導できることを確認した。

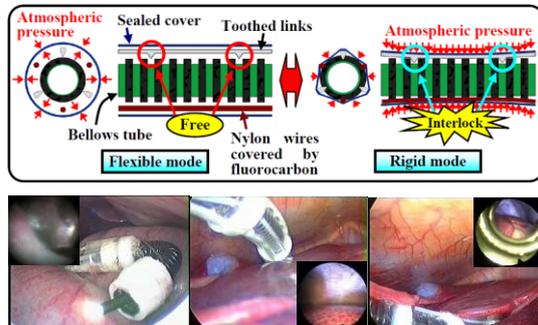


図9：柔剛可変外套筒マニピュレータ

また、さらなる細径化のため、微細な歯車駆動式の小型屈曲機構を搭載した2自由度のマニピュレータを外径5mmで試作した、低トルクでの屈曲が可能であり、本機構により根元部分を軟性素材に置換できるようになるため、柔剛可変外套管への挿入が可能となる。

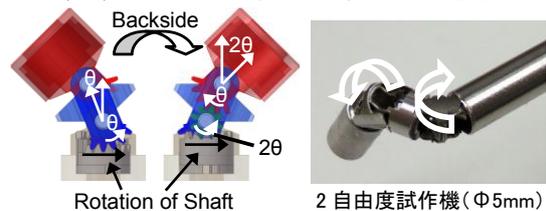


図10：歯車駆動式屈曲マニピュレータ試作機.

(6) 体内深部局所小型 MRI コイル

小型 RF コイルを試作し高解像度化や臨床使用に適したコイルについて検討した。厚さ $35\mu\text{m}$ の銅箔を用いてシングルループ型コイルおよび鞍型コイルを製作し、7T の磁場強度を有する実験用 MRI 装置と制作したコイルを用いてアクリルファントムおよびラット直腸周辺組織を撮影し、モニタリング可能範囲について評価検討を行った。鞍型コイルを用いて鉗子外径5mmと同程度の範囲で $20\times 20\mu\text{m}^2$ 程度の高解像度・高 S/N 比の断層像撮影が可能であり、基盤技術と手法が確立された。

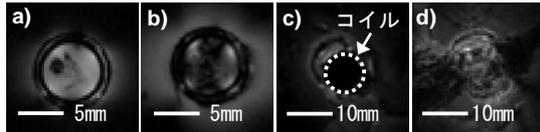


図 11 : a)・b)アクリルファントムの MR 撮像画像 (GRE 法, スライス厚 1mm). a) フリップ角 20° , S/N 比 14.3. b) フリップ角 150° , S/N 比 14.5. c)・d)ラット直腸周辺の MR 撮像画像 (GRE 法, スライス厚 2mm, フリップ角 150°). c) 横断面像. d) 矢状断面像.

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 10 件)

- ① Hongen Liao, Ichiro Sakuma, Takeyoshi Dohi, et al.: Precision-guided Surgical Navigation System using Laser Guidance and 3-D Autostereoscopic Image Overlay, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 33, 2009.
- ② チェン フィー ホワン, 土肥健純, 他: 裸眼立体画像表示技術とサーフェスマッチング法を用いた膝関節手術支援ナビゲーションシステムの開発, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 14(1), 49-54, 2009
- ③ Liao H, Dohi T, et al.: Fetus-supporting flexible manipulator with balloon-type stabilizer for endoscopic intrauterine surgery, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MEDICAL ROBOTICS AND COMPUTER ASSISTED SURGERY*, 4(3), 214-223, 2008.
- ④ 寺口剛仁, 土肥健純, 他: 回転プリズムシートによる Integral Videography 解像度向上に関する研究, *映像情報メディア学会誌*, 62(4), 572-577, 2008.
- ⑤ Hiromasa Yamashita, Takeyoshi Dohi, et al.: Miniature bending manipulator for fetoscopic intrauterine laser therapy in twin-to-twin transfusion syndrome, *Surgical Endoscopy*, 22(2), 430-435, 2008.
- ⑥ 八木昭彦, 土肥健純, 他: スライダリンクと空気圧を用いた手術器具挿入支援用柔軟可変外套管の開発, *JJSCAS*, 9(1), 15-22, 2007.
- ⑦ 山下紘正, 佐久間一郎, 土肥健純, 他: バイポーラ型電気メスを搭載した細径多自由度屈曲鉗子マニピュレータの開発, *JJSCAS*, 9(2), 91-101, 2007.
- ⑧ 廖洪恩, 土肥健純, 他: 内視鏡下胎児手術における柔支持マニピュレータの研究, *生体医工学*, 44(4), 643-649, 2006.
- ⑨ 廖洪恩, 佐久間一郎, 土肥健純, 他: Open MRI 誘導下脳神経外科手術のための Integral Videography によるイメージオーバーレイナビゲーション, *生体医工学*, 43(4), 568-577, 2005.
- ⑩ ヘルランバン ニコラス, 高本真一, 土肥健純, 他: 低侵襲心臓外科手術用リアルタイム三次元超音波 Integral Videography, *生体医工学*, 43(4), 769-776, 2005.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Huy Hoang Tran, Takeyoshi Dohi, et al.: Interactive 3D auto-stereoscopic image guided surgical navigation system with GPU accelerated high-speed processing, *AMI-ARCS2009*, 28-35, 2009
- ② Ken Masamune, Shinichi Takamoto, Takeyoshi Dohi, et al.: Novel Endoscope System with Plasma Flushing for Off-Pump Cardiac Surgery, *MICCAI2009*, LNCS5761, 451-458, 2009.
- ③ 山下紘正, 土肥健純, 他: 歯車機構を用いた胎児外科用屈曲マニピュレータの研究開発, 第 18 回日本コンピュータ外科学会大会, *JJSCAS*, 11(3), 214-215, 2009.
- ④ T. Ando, H. Iseki, I. Sakuma, et al.: Intraoperative Local Demarcation System of Brain Tumor based on 5-ALA induced Porphyrin Fluorescence, *APCMBE 2008*, IFMBE Proc 19, 754-757, 2008
- ⑤ Siyang Zuo, Takeyoshi Dohi, et al.: MRI-Compatible Rigid and Flexible Outer Sheath Device with Pneumatic Locking Mechanism for Minimally Invasive Surgery, *MIAR2008*, LNCS5128, 210-219, 2008.
- ⑥ Nicholas Herlambang, Takeyoshi Dohi, et al.: Real-Time Autostereoscopic Visualization of Registration-Generated 4D MR Image of Beating Heart, *MIAR2008*, LNCS5128, 349-358, 2008.
- ⑦ 上内洋輝, 土肥健純, 他: ビームスプリッタを用いた視野可変内視鏡試作機の開発および体内挿入試験, 第 17 回日本コンピュータ外科学会, *JJSCAS*, 10(3), 277-278, 2008.
- ⑧ 水谷正紘, 高本真一, 土肥健純, 他: 僧帽弁閉鎖不全の Off-Pump 治療クリッピング

デバイス:クリッピング機構の in vivo 実験による評価, 第 17 回日本コンピュータ外科学会, JJSCAS, 10(3), 293-294, 2008.

- ⑨ Kim K, Dohi T, et al.: Evaluation experiments on wide FOV wedge prism endoscope, CARS2006, 506, 2006
- ⑩ 浦野克紀, 土肥健純, 他: 小型鞍型 RF コイルを用いた MRI における撮像範囲の基礎的評価, 第 14 回日本コンピュータ外科学会大会・第 15 回コンピュータ支援画像診断学会大会 合同論文集, 171-172, 2005.

[図書] (計 2 件)

- ① 土肥健純, 廖洪恩: インテグラルフォトグラフィの表示原理, 立体視テクノロジー—次世代立体表示技術の最前線—(分担), エヌ・ティー・エス(2008 年 10 月発行).
- ② 廖洪恩, 土肥健純: 特殊眼鏡不要の大型ディスプレイの開発, 立体視テクノロジー—次世代立体表示技術の最前線—(分担), エヌ・ティー・エス(2008 年 10 月発行).

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: マニピュレータ及びこれを用いたマニピュレーション装置

発明者: 山下紘正, 土肥健純, 正宗賢

権利者: 国立大学法人東京大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-204642

出願年月日: 2009 年 11 月 10 日

国内外の別: 国内

名称: 内視鏡装置

発明者: 土肥健純, 正宗賢

権利者: 土肥健純, 正宗賢

種類: 特許

番号: 特願 2007-138415, 特開 2008-272388

出願年月日: 2007 年 4 月 25 日

国内外の別: 国内

名称: 三次元画像表示方法

発明者: 廖洪恩, 土肥健純, 岩原誠

権利者: 有限会社ディー・エイチ・エス

種類: 特許

番号: 特願 2006-355442, 特開 2008-165013

出願年月日: 2006 年 12 月 28 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ:

・ <http://www.atre.t.u-tokyo.ac.jp>

報道関連情報:

① 「3D 映像使い胎児・がん治療 裸眼 OK・リアルタイム 医療分野に大きな需要 医師、距離感つかみやすく」, 日本経済新聞, 2010 年 3 月 1 日

② 「おはよう日本 メガネなくても立体映像開発進む 3D 技術」, NHK 総合, 2009 年 11 月 19 日

③ 「3D 現場に生かす(下) 飛び出す画像 事業の芽」, 日本経済新聞, 2009 年 11 月 12 日

④ "Changeable Endoscopic Surgery", The Japan Journal, Vol. 5 No. 10, FEBRUARY 2009

⑤ "Robosurgeon", The Japan Journal, Vol. 5 No. 10, FEBRUARY 2009

⑥ 「胎児手術用の極細鉗子」, 日経産業新聞, 2006 年 9 月 6 日

⑦ "A Cut Above", The Japan Journal, Vol. 2 No. 12, APRIL 2006

⑧ 「極細鉗子子宮切開不要に」, 日経産業新聞, 2006 年 1 月 23 日

⑨ 「曲がる電気メス東大が試作品開発」, 日経産業新聞, 2005 年 10 月 28 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土肥 健純 (DOHI TAKEYOSHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号: 20171944

(2) 研究分担者

佐久間 一郎 (SAKUMA ICHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 50178597

(H20→H21: 連携研究者)

下山 勲 (SHIMOYAMA ISAO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 60154332

(H18 まで)

高本 眞一 (TAKAMOTO SHINICHI)

東京大学・大学院医学系研究科・教授
研究者番号: 60092293

(H20→H21: 連携研究者)

伊関 洋 (ISEKI HIROSHI)

東京女子医科大学・先端生命医科学研究
所・教授

研究者番号: 90119892

(H20→H21: 連携研究者)