

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32657
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2010～2014
 課題番号：22300181
 研究課題名(和文) 器械出し看護師ロボットにおける中枢神経系と末梢神経系の構築と統合に関する研究

 研究課題名(英文) Development of central and peripheral nervous systems for Scrub Nurse Robot and those integration

 研究代表者
 宮脇 富士夫 (MIYAWAKI, FUJIO)

 東京電機大学・理工学部・教授

 研究者番号：50174222

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：C++で記述したプログラムとUppaalで記述した外科モデルとの通信を可能とするソフトウェア的アダプタであるDTRONの開発によって、SNRの末梢神経系と中枢神経系が統合され、SNRは術中情報および自分自身の行動やその目的を”認識”できるようになった。手術野で使用されている手術器具情報を実時間に取得するシステムはほぼ完成した。RFIDアンテナが隙間無く敷き詰められた手術器具トレイ上の手術器具の認証と位置同定はまだであるが、隣り合うアンテナを2mm離せば同定は可能となった。腹部内臓の実時間同定に関して、種々の波長の光に対するウサギ腹部臓器表面の反射特性に臓器特異的なパターンがあることが判った。

研究成果の概要(英文)：We developed a software adapter "DTRON" which enabled C++-based application programs to communicate with a Uppaal-based surgical model, or the integration of SNR's peripheral and central nervous systems, thereby making the SNR behave as if it 'recognized' what was going on in the operating room and what it was doing for what purpose. We also almost completed the system that made possible real-time acquisition of the information on use of surgical instruments in the operative field, but did not finish development of the system that was capable of obtaining individual and positional identification of instruments placed on the surgical tray that had many RFID antennas which were placed without any gap between any neighboring two antennas. When the gap was 2 mm, the identification was achieved. In realtime identification of abdominal organs, we found they had their respective patterns of light reflected by their surfaces when rabbits' organs were exposed to light of various wavelengths.

研究分野：生体医工学

キーワード：知能ロボティクス 外科 モデル化 手術支援 看護師ロボット RFID手術器具使用情報自動取得システム RFID手術器具トレイ・サブシステム 臓器同定

1. 研究開始当初の背景

器械出し看護師の不足は深刻であり、これを解消するために器械出し看護師ロボット (Scrub Nurse Robot: SNR) を考案・提唱してきている。器械出し看護師は外科手術において外科医が必要とする手術器具やガーゼなどを手渡し、外科医が使い終えた手術器具を次の使用に備えて準備することを業務とする。SNRの到達目標は“的確な器具提供”と“正確な器具予測”であり、これを実現するために種々のサブシステムから構成される SNR システムを研究開発してきた。

まず、SNR に外科手術とはどういうものが“理解・記憶”させるために(“外科手術のプランあるいはイメージ”を移植するために)、Uppaal 形式時間オートマトン (Uppaal timed automaton (TA)) で記述した外科手術モデルを作成した。この外科手術モデルは外科手術の手順ばかりでなく、外科医や器械出し看護師が手術中にどのような行為を行うのか、さらには患者の状態や使用される手術器具の情報など、SNRの円滑な手術支援に必要と考えられるものを全てモデル化したものである。このように複雑なものを一般的なコンピュータ言語 (例えば C++ など) で記述すると、大変な時間と労力を要する。一旦完成しても、それに修正や変更を加えるとなると、非常に困難な作業を強いられることになる。しかし、Uppaal TA はこのような複雑なものでも容易に短時間で記述できる優れた特長を持っているため採用した。

同時に、手術室などの実空間で駆動するサブシステムも構築してきた。例えば、SNRの器具提供方法に関するサブシステムでは、実際の器械出し看護師とは異なり SNR は手術器具を外科医に手渡すのではなく、手術野の或るポイントに自ら運ぶという新しい器具提供サブシステムを開発した (図1)。

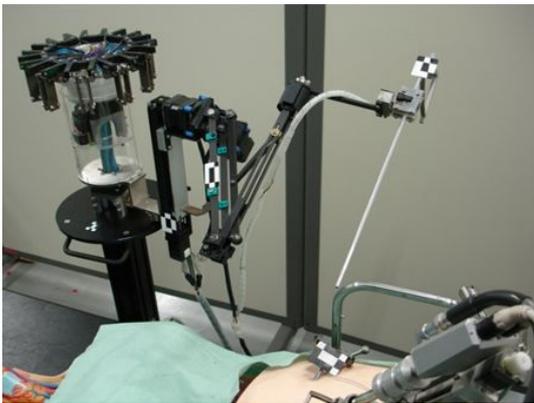


図1 SNR3号機

さらに、手術野で使用されている手術器具情報をリアルタイムに SNR に伝達するサブシステムも開発した。これらのサブシステムは前記の外科手術モデルと無関係に駆動するが、この外科手術モデルと連動できれば、SNR は手術室で現在何が行われているのか、また何故自分が何をしているのかなど、あたかも“認識”できているかのように振る舞う

ことができるのではないかと考えた。さらに、手術進行に応じて使用される手術器具は変わりうるので、より効率の高い手術支援も期待できる。

しかし、殆どの機械部品や電気・電子回路を制御するアプリケーション・プログラムは C++ 言語に代表されるコンピュータ言語によって記述されており、前記の SNR のサブシステムもそうであるが、Uppaal TA との間で信号の遣り取りができないという問題があった。そこで、タリン工科大学の Vain 教授グループと共同して、これを可能とするソフトウェア・アダプタを開発した。まず、Uppaal TA には、作成したモデルにおける“状態” (一般的な TA では“state”、Uppaal TA では“location”)、“遷移”、“コマンド”をネットワーク・プロトコルとして出力可能にさせる TRON (Testing Realtime Systems ONline) という環境があり、この TRON の“アダプタ”がそのネットワーク・プロトコルを読み取り、理解し、クライアント側にコマンドを伝える役割をする。しかし、これらは Uppaal TA で記述されたモデルの検証に使用された例はあるものの (元々 Uppaal はモデルのシミュレーションやモデルの検証のために作成されたツールであるので)、ロボットなどの機械や装置を駆動・制御する試みはなされていなかった。我々はモデルの検証と機械の駆動・制御は実質的に非常に近い関係にあることに気付き、既存の TRON とそのアダプタに 1,000 行以上もの Java code を書き加えることによって、ロボットの駆動制御を可能にするプログラムを作成した (既存のものとの差異を明確にするために JTRON と命名)。

2. 研究の目的

本研究の第一目的は、C++ 言語で記述した SNR 駆動用のアプリケーション・プログラムと Uppaal TA で記述された外科手術モデルとの間で信号の送受信を可能とすることである。この観点からすると、外科手術モデルは SNR の中枢神経系に例えることができ、他のサブシステムは言わば末梢神経系とみなすことができるので、中枢神経系と末梢神経系の統合と言える。さらに、SNR の他のサブシステムの新規開発と既開発のサブシステムの改良および拡充も本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) “外科モデルによる SNR 駆動”および“術中情報取得による外科モデル駆動”

前述の JTRON の進化版である DTRON を開発した。実際の外科モデルと SNR サブシステムの駆動・制御を行う C++ アプリケーション・プログラムの間に組み入れる前に、DTRON の基本的な点を検討した。まず、Uppaal TA と C++ それぞれにおいて単純なプログラムを作成し、DTRON によって信号の遣り取りが可能かどうか、また同時に DTRON における信号の遣り取りに費やされ

る時間も計測した。次に、簡単な SNR 駆動プログラムを作成し、SNR のアームやハンドの駆動およびそれに要する時間も計測した。

最後に、実際の外科モデルと実際の複数の C++アプリケーション・プログラムとの間で信号の遣り取りが必要な箇所を決定し、そこに DTRON を組み込み、“外科モデルによる SNR 駆動”および“術中情報取得による外科モデル駆動”が可能かどうか検証した。すなわち、術中にリアルタイムに取得される種々のデータによって、外科手術モデルの状態が遷移できること、さらにこの状態遷移によって C++アプリケーション・プログラムが駆動できることを検証した。また同時に、外科モデルと C++アプリケーション・プログラムにも適宜改良を加えた。

(2) 鏡視下手術の手術野における手術器具使用情報自動取得サブシステムの発展

鏡視下手術の場合、体腔内に内視鏡や手術器具を挿入して手術を行うが、器具を適宜交換しつつ個々の外科操作に最適な器具で手術を進める。そこで素早い器具交換を可能にするために、患者の体壁に中空管（トロカール・カニューレ：TC）を挿入留置し、それを介して手術器具の挿入抜去を行う方式をとっている。

我々は TC の入口に RFID アンテナを内蔵させ、手術器具（約 40 cm 長）のシャフト部分に円盤状の RFID タグを装着させる方式によって手術野における手術器具の同定と正確な使用時刻の記録が可能なシステムを開発した。しかし、円盤状のタグを器具に装着すれば実際の手術では邪魔になる恐れがあるため、実際の手術でも全く違和感を生じさせないようにタグを薄いフィルム状タグに変更し、手術器具のシャフトに貼付する方針に変更した（図 2）。これによって、RFID アンテナの構造も根本的に変えなければならず、種々の構造の RFID アンテナを検討した。

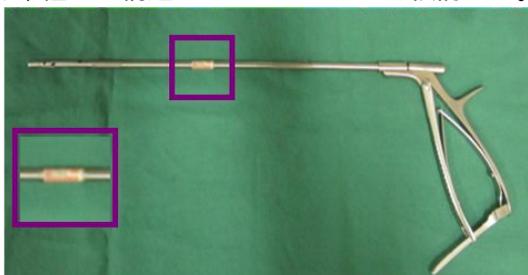


図 2 シャフトに貼付されたフィルム状タグ

(3) 手術器具の位置情報取得と個別認証が可能な器具トレイ・サブシステムの開発

手術野で使用されていない手術器具は器具トレイ上に置かれる。SNR はこのトレイ上に置かれた多数の手術器具を個別認証できるばかりでなく、その位置までも同定できれば、次に必要となる手術器具を外科医に提供できない。

そこで、我々は前記のサブシステムと同様に RFID 技術を用いて、個別認証と位置同定

が可能な RFID 手術器具トレイを考案した。まず RFID 手術器具トレイのサイズを 40 × 40 cm とし、このトレイ上で 1 cm 四方の空間分解能を達成するために（言わば 1,600 個の 1 cm 四方の番地をトレイ上に割り当てるために）、40 本の 10 × 40 cm のアンテナを縦一列に並べ、これに重ねるように 40 本の 40 × 10 cm のアンテナを横一列に並べる方式を考案した。これら 80 本の RFID アンテナを電磁リレー切替器で切り替えることには成功していたが、全てのアンテナ上をスキャンし終えるのに数秒要する欠点があった。

そこで理論上は切替時間がナノ秒単位である半導体素子の可能性を検討することとし、1 個の半導体素子切替器によって、80 本のアンテナ切替が短時間に行えるかどうか、さらに器具トレイ上に置かれた手術器具のシャフト部分に貼付されたフィルム状 RFID タグの位置同定が可能かどうか検討した。

(4) SNR3 号機のハンドの改良

まず、ハンドの軽量化を図るために、それまでのエアチャックではなく、マッキベン・アクチュエータを使用することとし、設計を根本的に変更した。さらに、平滑な手術器具トレイ上に置かれた器具を安定的かつ確実に掬い上げることができ、さらに把持した手術器具を 90°傾けても落下しないように設計し、これらが可能かどうか検討した。

(5) 内視鏡画像のリアルタイム解析

内視鏡画像をリアルタイムに解析し、内視鏡が捉えている臓器の同定を可能にするために、ニューラルネットワークを用いた手法をタリン工科大学と共同で開発し、その有効性を検討した。

また、研究代表者の研究室独自に、臓器同定が可能な方法を考案し、その実現可能性も検討した。具体的には、動物実験にて、種々の波長の不可視光を臓器表面にあて、その反射特性を検討することによって、臓器特異性パターンの有無を検討した。

(6) 器具予測機能

SNR の到達目標の 1 つに、外科医が次に使用する手術器具を正確に予測する機能を掲げてきた。比較的単純な手法でどの程度の器具予測が可能か、すでに取得している手術器具使用情報データベースを使って検討した。

具体的には、以下のような器具予測アルゴリズムを検討した。まず、現在進行中の手術において、現在使用されている手術器具とそれまでに使用された器具の使用順序を検索対象データとする。例えば、現在使用中の器具のみを検索対象とする場合は比較器具数 1 の検索対象データとなる。また、現在の器具と直前に使用された器具の 2 つを検索対象とする場合は、比較器具数 2 の検索対象データとなる。

現在の手術と同一の術式で行われた複数の過去の手術において、検索対象データと同一のデータを全て抽出し、それぞれその次に使用された手術器具を予測器具の候補とし、

それらの中で最も頻度の高かった器具を現在の手術でも次に使用されるはずの器具と予測する。

この器具予測アルゴリズムの有効性は次のような方法で検討した。まず比較器具数を1から一刻みずつ10まで設定し、その全てにおいて、現在進行中の手術における全ての器具でこの予測を繰り返し、実際に使用された次の器具と的中しているかどうか確かめた。そして、現在の手術で使用された全ての器具のうち予測が的中した器具の比率(的中率)を求め、この的中率を器具予測アルゴリズムの評価指数とした。

4. 研究成果

(1) “外科モデルによるSNR 駆動”および“術中情報取得による外科モデル駆動”

DTRON 経由で C++ と Uppaal TA 間で送受信を 10 回繰り返すプログラムを作成し、送受信が可能であることをまず実証した。次に時間計測を行ったところ、1 回目の送受信は約 9 msec だったが、2 回目以降 10 回目までは各々約 1.1 ~ 1.2 msec と格段に短縮することが判った。1 回の送受信で DTRON を 2 回経由させるので、2 回目以降の送受信の場合(送受信時間が約 1.1 ~ 1.2 msec の場合)、DTRON における信号処理には約 0.5 ~ 0.6 msec 要したことになる。

1 回目の送受信に非常に時間がかかった理由は不明ではあるが、DTRON を使用した場合ネットワークに接続する必要があり、C++ 側から Spread に接続することになる。前記の時間には当然この Spread への接続時間は含まれていないが、必ず接続直後の送受信時間だけが非常に長くなる結果が得られているので、Spread 以外のネットワーク要素が遅延要素になっているのかもしれない。

次に、SNR のアームを横たわっている手術器具の直上まで動かしてハンドを開き(1 回目の送受信が行われる)、ハンドを下げ手術器具を掴む(2 回目の送受信が行われる)という動作を行わせた結果、1 回目の送受信には上記と同様に時間がかかったが、2 回目の送受信には約 1.4 msec しか要しなかった。この動作も DTRON を 2 回経由しているため、1 回の DTRON 経由時間は約 0.7 msec という結果が得られた。前記のソフトウェア単独の評価実験より若干長い時間が計測されたが、その理由も不明である。しかしながら、この 0.7 msec という値が奇しくも、ヒトの運動神経のシナプス 1 個分の信号伝達時間とされる 0.5 msec に近かった点が興味深い。

(2) 鏡視下手術の手術野における手術器具使用情報自動取得サブシステムの発展

金属製手術器具シャフトに貼付した薄いフィルム状の RFID タグの情報を安定的に読み取ることが可能な RFID アンテナ内蔵トロカール・カニューレの開発に成功した。さらに、トロカール・カニューレ入口部に装着した RFID アンテナの導線を直径 0.2 mm から

1.0 mm に太くし(図 3)、インピーダンスを 50 Ω にマッチングさせることによって、大きな環境ノイズ下でも金属製手術器具シャフトに貼付したフィルム状 RFID タグの情報を安定的に読み取ることが可能となった(図 4)。

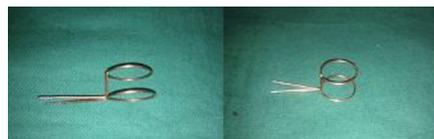


図 3 導線径 1 mm の RFID アンテナ

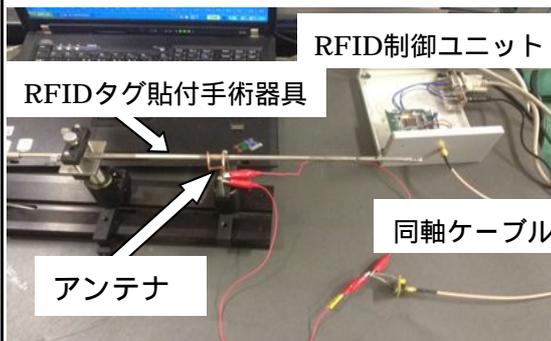


図 4 RFID アンテナ評価実験

また、電気メス使用時に電磁干渉が発生しても誤認識を起こさない方法も開発した(雑誌論文の、学会発表)。

(3) 手術器具の位置情報取得と個別認証が可能な器具トレイ・サブシステムの開発

半導体素子によるアンテナ切替器を開発した。これまでの電磁リレー切替器では 1 回の切替時間は 10 ms であったが、半導体素子の場合には 80 ns に短縮された。

しかし、トレイ上での 1 cm 四方の空間分解能はまだ達成できていない。すなわち、隣り合うアンテナ間距離 0 mm が達成できていない。電流を流しているアンテナとそれに隣り合うアンテナ間の距離を短くすればするほど、電流を流していない隣のアンテナに発生する誘導起電力は大きくなり、同時に電流を流しているアンテナの電圧が低下する現象が認められた。すなわち、電流を流しているアンテナ上で RFID タグが読めず、電流を流していない隣のアンテナ上で読めるという不読・誤読現象が発生した。

そこで、アンテナ導線径による影響を検討した結果、アンテナ径を 0.2 mm から 1.0 mm に太くすることによって、正しく認識できる

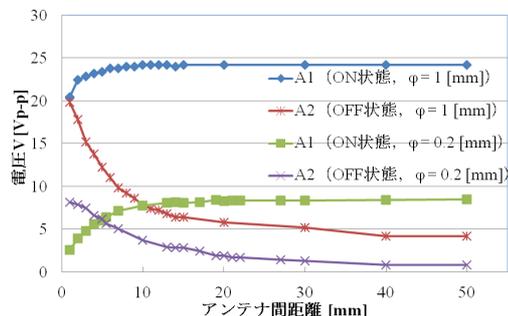


図 5 アンテナ間距離と誘導起電力

アンテナ間距離を 14 mm から 5 mm に縮めることができた。さらに、半導体素子アンテナ切替回路を介さない場合には 2 mm 離せば正しく読めることも判明した(図 5)。以上のように、アンテナ間距離をゼロにするには、まだまだ改善の余地は多いが、現在或る方法の可能性を追究している。

(4) SNR3 号機のハンドの改良

1 個のマッキベン・アクチュエータで駆動するハンドを作製し、ハンドの軽量化に成功した。さらに、手術器具把持部の構造にも工夫を加えて平滑な器具トレイ上に置かれた

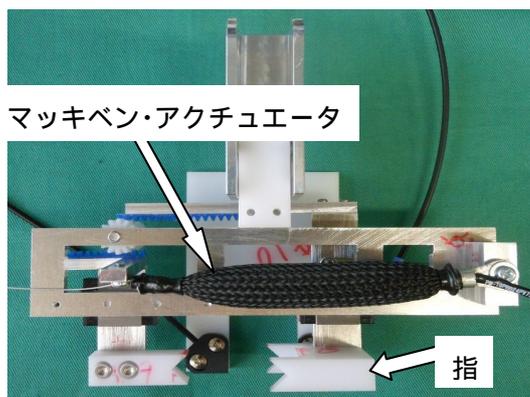


図 6 マッキベンアクチュエータ駆動ハンド

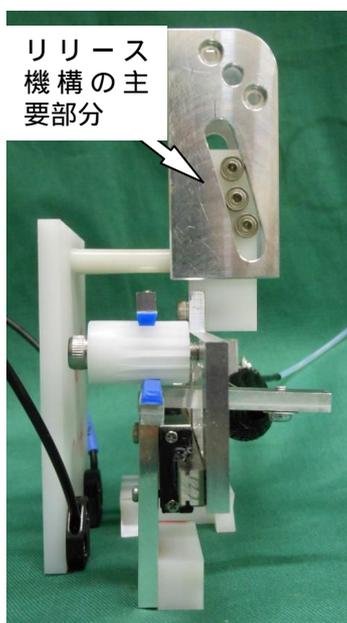


図 7 器具リリース機構

器具を安定的かつ確実に抑え上げることができるようになった(図 6)。さらに把持した手術器具(重量 180 g 重)を 90° 傾けても落下しないことも確かめた。また、SNR ハンドが掴んでいる手

術器具の柄を執刀医が把持し少し持ち上げただけで、SNR が器具を放す機構(図 7)を考案し具現化できた。

(5) 内視鏡画像のリアルタイム解析

ニューラルネットワークを用いた手法をタリン工科大学と共同で開発し、胆嚢の同定が可能であることを示した(雑誌論文と)。

また、種々の波長の不可視光をウサギ腹部臓器(肝臓、大腸、胃、小腸、大網)に照射し、反射特性を検討した結果、臓器特異的なパターンが得られた。

(6) 器具予測機能

比較器具数の少ない方が、的中率の高い傾向が得られた。特に比較器具数 2 の場合が一番高い中率である例が多く、60~70%の値を示した(図 8)。

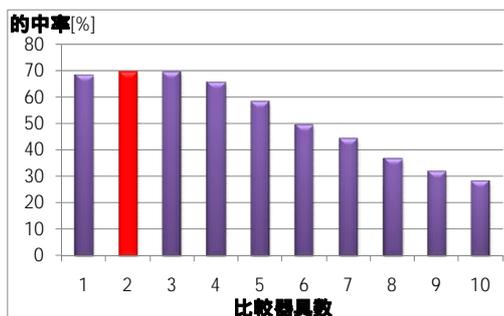


図 8 的中率と比較器具数

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 4 件)

宮脇富士夫, 吉光喜太郎、正宗 賢、福井康裕、橋本大定、器械出し看護師ロボット(Scrub Nurse Robot)システムの開発、小切開・鏡視外科学会雑誌、査読有、Vol. 5、No. 1、2014、pp. 51-57、

Miyawaki E, Namiki H, Kano K, Development of Real-time Acquisition System of Intraoperative Information on Use of Surgical Instruments for Scrub Nurse Robot, Proceedings of the 18th IFAC (International Federation of Automatic Control) World Congress, 査読有, 2011, 9458-9463

Artemchuk I, Petlenkov E, Miyawaki F, Neural Network Based System for Real-time Organ Recognition During Surgical Operation, Proceedings of the 18th IFAC (International Federation of Automatic Control) World Congress, 査読有, 2011, 6478-6483

Artemchuk I, Petlenkov E, Miyawaki F, Gladki A, Neural Network based System for Real-time Organ Recognition by Analysis of Sequence of Endoscopic Images received during Surgical Operation, Proc. of 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010) CD-ROM, 査読有, 2010, 349-352

〔学会発表〕(計 12 件)

Kazuki Kano, Fujio Miyawaki: RFID-Based Subsystem of Real-time Acquisition of Intraoperative Information on Use of Surgical Instruments in Scrub Nurse Robot System – Improvement in Detection of Use of Electric Knife. World Congress 2012 Medical Physics and Biomedical Engineering (2012/05/28)

Beijing

Fujio Miyawaki, Hiromi Namiki, Kazuki Kano: Development of Real-time Acquisition System of Intraoperative Information on Use of Surgical Instruments for Scrub Nurse Robot. 2011IFAC (2011/08/31) Milan

Igor Artemchuk, Eduard Petlenkov, Fujio Miyawaki : Neural Network Based System for Real-time Organ Recognition During Surgical Operation. 2011IFAC (2011/08/30) Milan

Kazuki Kano , Fujio Miyawaki : One Solution to Prevent False Recognition During Use of Electric Knife in RFID-based Real-time Acquisition System for Surgical-Instrument Information . 第 50 回日本生体医工学会 (2011/04/30) 東京

Ryuhei Suga , Yuta Sugama, Yasuhiro Fukui, Fujio Miyawaki : Development of RFID Surgical Tray Enabling Scrub Nurse Robot (SNR) to Identify and Localize Surgical Instruments at a Spatial Resolution of 10 x 10 mm . 第 50 回日本生体医工学会 (2011/04/29) 東京

Hiroaki Ishii , Ryuhei Suga, Fujio Miyawaki : Development of Application Program Enabling Scrub Nurse Robot (SNR) to Identify and Locate Surgical Instruments on RFID-based Surgical Tray . 第 50 回日本生体医工学会 (2011/04/29) 東京

Kazuhiro Aoki , Yuta Sugama, Yasuhiro Fukui, Fujio Miyawaki : Development of Trocar-Cannula RFID Antenna for Film-type Tag to Acquire Information on Use of Surgical Instruments in Real Time in Endoscopic Surgery . 第 50 回日本生体医工学会 (2011/04/29) 東京

Fujio Miyawaki , Hiroaki Ishii, Ryuhei Suga, Kazuhiro Aoki, Tetsuo Morinaga, Yuta Yoshioka, Kazuki Kano, Yuji Oyatsu : Development of Scrub Nurse Robot to support next generation of surgical operations . 第 50 回日本生体医工学会 (2011/04/29) 東京

I. Artemchuk, E. Petlenkov, F. Miyawaki, A. Gladki: Neural Network based System for Real-time Organ Recognition by Analysis of Sequence of Endoscopic Images received during Surgical Operation. 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010) (10/10/4-6) Tallinn

Hiromi Namiki , Fujio Miyawaki, Daijyo Hashimoto : Development of Real-time System to Acquire and Analyze Information on Surgical

Instruments Used in Endoscopic Surgery . 第 49 回日本生体医工学会 (2010/06/25) 大阪

Ryo Okamoto , Fujio Miyawaki : Mechanism Detecting Electrocautery-Associated Signals to Prevent False Recognition in RFID-Based Acquisition System of Surgical-Instrument Information . 第 49 回日本生体医工学会 (2010/06/25) 大阪

Ryuhei Suga , Hiroaki Ishii, Yasuhiro Fukui, Fujio Miyawaki : Development of RFID Surgical Tray System Enabling Location of Surgical Instruments on the Tray as Well as Their Identification . 第 49 回日本生体医工学会 (2010/06/25) 大阪

〔産業財産権〕
○取得状況 (計 1 件)

名称: 鏡視下手術における手術情報リアルタイム取得・解析システムおよび方法
発明者: 宮脇 富士夫
権利者: 学校法人 東京電機大学
種類: 特許
番号: 特許第 5467295 号
出願年月日: 平成 21 年 1 月 6 日
取得年月日: 平成 26 年 (2014 年) 2 月 7 日
国内外の別: 国内

〔その他〕
研究室ホームページ:
<http://www2.miyawaki-lab.com/>
<http://www.miyawaki-lab.com/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

宮脇 富士夫 (MIYAWAKI, Fujio)
東京電機大学・理工学部・教授
研究者番号: 5 0 1 7 4 2 2 2

(2)研究分担者

福井 康裕 (FUKUI, Yasuhiro)
東京電機大学・理工学部・教授
研究者番号: 6 0 1 1 2 8 7 7

大内 克洋 (OHUTI, Katsuhiko)
鈴鹿医療科学大学・医用工学部・准教授
研究者番号: 2 0 3 2 2 0 8 4
(2011 年度まで)

(3)連携研究者

吉光 喜太郎 (YOSHIMITSU, Kitaro)
東京女子医科大学・先端生命医科学研究
所・博士研究員
研究者番号: 0 0 5 5 1 3 2 6
(2010 年度まで)