

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22650115

 研究課題名（和文） 高密度情報誘導手術環境を支援する手術工程解析法と  
評価システムの開発

 研究課題名（英文） Surgical process analysis for supporting complex information-guided  
surgery environment

研究代表者

中村 亮一（NAKAMURA RYOICHI）

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30366356

研究成果の概要（和文）：本研究では複雑化する外科医療の品質向上を達成するための手術工程解析技術の創世を目的とする。特に手術ナビゲーション情報と手術室内俯瞰映像情報を元に術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術と腹腔鏡下胆嚢摘出術の工程評価を行うアルゴリズムを開発し、システムとして実装評価した。ナビゲーション情報による手術管理システムでは両術式とも工程の推定と手技の特長の定量化が可能である事を確認出来た。手術室内映像情報では複数カメラによる動線の3次元導出と、動線特徴量を用いた工程遷移場面の抽出可能性を示すことが出来た。

研究成果の概要（英文）：On this project we aimed to create a novel analysis system for a surgical workflow to achieve high-quality surgery. Especially, we developed workflow analysis system for iMRI-guided glioma surgery and laparoscopic cholecystectomy using the information from surgical navigation system and video images in operation rooms (OR). Our system showed great ability for workflow estimation and quantification of the characteristics of surgeons' procedures only using surgical navigation information. The results of video analysis of OR show the ability of visualization and analysis of 3 dimensional trajectory of medical staff, and the ability of workflow estimation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,900,000	480,000	3,380,000

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：コンピュータ外科学，手術ナビゲーション，作業評価，分布解析

## 1. 研究開始当初の背景

医療技術の高度化・複雑化と慢性的な人手不足により、特に外科医療分野においては医療従事者の負担が増大し安全・安心を担保した治療環境の達成が難しくなっている。また2003年4月より、全国の特設機能病院では診断群分類に基づく医療機関別包括評価による医療費の定額支払制度が実施されており、最適な医療を行う能力が医療者に求めら

れる仕組みとなっている。複雑かつ並列に複数のタスクの流れる作業環境においてその作業の効率を最適化し、最小のコストで効用を最大化するためには、作業の要素解析と工程管理により、それぞれの作業ステージを最適化することが重要である。しかし職人的な高度技術職能の性格を持つ手術の領域では、このような「工業的な生産管理体制」は投薬・器材・予定管理等のエリアに限定され、

術式そのものに対する導入は未だ達成されていない。

鈴木らは情報システムにより手術の進捗管理を行い、準備において手術室外対応可能なものを抽出し手術室占有時間を減少し手術件数を増やす試みを行っている(鈴木他, 医療情報学 26(1):47-52, 2006). しかしながら, 中心となる肝心の手術作業(開創から閉創まで)自体を工程分析し, 自動的にどのステージにあるのかを把握するまでには至っていない. また術式の最適化を行う上で, 作業内容が多岐にわたり複雑な行程を経る手術においては, そのどこに問題がありどこを改良すべきかについて, 作業員や指導者が定量的かつ客観的に評価することは難しい. この作業を行う上でも長い手術を各ステージに分割し, それぞれのステージ毎に評価することが必要である. 本分野は **Surgical Workflow** 研究として独 Leipzig 大学等を中心にここ数年始まっている(M. Fischer et al, proc CARS2005 851- 855, 2005)が, 自動化についての研究は萌芽領域である.

申請者はこれまで情報科学による高精度低侵襲手術支援技術について研究を行ってきた. 術中 MRI を併用した脳腫瘍摘出術におけるナビゲーションや, 手術室内機器および室内映像・音声を収集し室外の指導医に配信することで治療戦略構築の支援を行う「手術戦略デスク」の開発を実施している. これらの手術環境の定量的情報を取得提示する技術環境が整備された現在, この情報を利用した術式のより詳細な分析と評価, そしてそれに基づく術式の最適化が重要である.

## 2. 研究の目的

本研究では, 外科医療の品質向上(効用・効率・安全の向上)を達成するための手術工程解析技術の創世を目的とする. 品質管理・省力化のための機械情報工学的技術をシステムと人間の調和的技術に昇華して医療に導入し, 過酷な外科医療環境によりよい業務環境と安全で効果の高い治療結果をもたらすことを目指す. 特に本研究で達成する工程解析・評価技術の中核は, 手術ナビゲーション及び手術室内映像情報という「デジタル手術データ」を用いた自動分析と定量的な評価データの獲得である.

## 3. 研究の方法

### 3-1. 術中 MRI 誘導下(ナビゲーション併用)脳腫瘍摘出術の手術工程・進捗解析システム

我々はこれまでにナビゲーションシステムの保有する患者情報(医用画像)と手術作業情報(誘導する術具の作業軌跡記録となる術具先端位置座標のログ情報)を用い, 手術対象臓器と術具位置ログの干渉を用いて腫

瘍摘出術の作業進捗度を定量化するシステムを開発した. また, この進捗度を利用して摘出完了時刻を推定する手法を開発している.(図1)

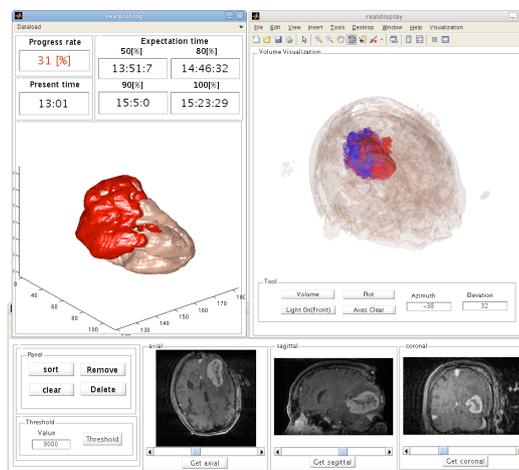


図1 脳腫瘍摘出術の作業進捗解析システム

本研究ではこのシステムをベースにさらに精度の高い詳細工程分類, 終了時刻予測を行うため, 術中 MRI 誘導下脳腫瘍摘出術を対象として以下の項目について研究と試作を行った.

- (1) 情報解析による治療工程ステージ分類アルゴリズムの開発  
術野の解剖学的情報の中から作業進捗分析に有用な特徴情報を抽出し, 治療中の術具位置ログデータと特徴情報の干渉を解析して腫瘍摘出進捗を示すアルゴリズムを構築した.
- (2) 標準工程データ作成技術の開発  
約 20 症例の臨床データから, 後述の手術進捗・終了予想のベースラインとなる標準作業時間を腫瘍体積から統計的に導出する手法を開発した.
- (3) 手術管理最適化のための手術進捗の予測  
(1)(2)の情報を基に, 摘出に要する時間を手術のリアルタイム進行状況から予測する手法を開発した.

### 3-2. 複数の単眼 CCD カメラ映像を用いた手術室内 3 次元動線導出システムと導線を用いた工程の予測

術野周辺の複数カメラの映像情報から機器・人員の作業状況を把握する画像処理技術を開発した.

- (1) 複数単眼 CCD カメラ映像と差分ステレオ法を応用した手術室内 3 次元動線導出システム

一般的な映像を利用した 3 次元動体解析としてはステレオカメラが利用されるが, 視線方向が固定で視野が限定されるため, オクル

ークジョンの問題が多く生じる。手術室内は空間が狭く多くの機材・人員が存在するためこの問題が生じやすい。そこで本研究では手術室に複数のカメラを取り付け、任意の2台で構成されたステレオ映像による3次元動体解析結果を組み合わせることで、オクルージョンを回避した3次元動線導出システムの開発を行った。

動線計測システムの構成を図2に示す。本システムは4台の単眼カメラ、ビデオレコーダ、計算機で構成される。カメラ映像による3次元動線導出のため、複数カメラペアでキャリブレーションを行い、相対的位置情報を取得する。複数カメラペアは隣接するカメラから構成された4組である。その後、歪み補正を行った各カメラの取得画像から背景差分処理により動体を抽出し、動体の特徴点を2次元動線として記録する。取得した特徴点を各カメラペアで三角測量法により統合し、4つの3次元位置を導出後、これらから最適な3次元位置(X, Y, Z)を推定し動線を作成する。

本手法では動体の頭頂部を特徴点と定めているため、障害物によるオクルージョンではZ座標に変動が見られることが多い。本システムでは、この点を考慮した推定アルゴリズムを用いて3次元動線を算出した。

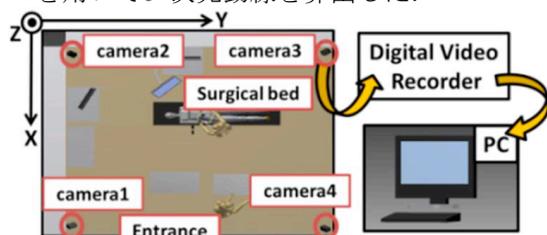


図2 動線導出システム

#### (2) 手術室内3次元動線を用いた工程予測

工程の変化時は人員・器材の大きな移動が多く、また移動する人員・器材の数も多いので動線は作業時よりも複雑になる。また手術室の出入り口以外のところに人員・器材が移動する可能性がある。したがって動体の移動距離と得られた座標値の重心と標準偏差により手術工程の変化時の動線の特徴を検出する試みを行った。

術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術を対象に、動体の3次元動線データを取得し手術工程変化時の動線の特徴を検出した。対象手術の手術工程は大きく導入、開頭、MRI撮影、腫瘍摘出、閉頭、退室に分けられる。そこで工程が変わる10秒間の動体の移動距離と重心と標準偏差を算出し、その特長を評価した。

#### 3-3. 腹腔鏡下胆嚢摘出術の手術工程・進

#### 捗解析システム

より複雑な工程を持つ手術の自動工程分離、工程内進捗評価と工程ごとの作業内容評価法の開発昨年までに開発した術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術用工程解析システムを、より複雑な工程を持つ腹腔鏡下胆嚢摘出術に応用した新しいシステムを構築した。ナビゲーションにて記録した術具位置ログデータ、術具種類情報、胆嚢モデルデータから作業ステージ、進捗度を自動同定・提示すると共に、術具位置ログデータの分布領域を解析することにより、手技の内容を客観評価するアルゴリズムを実装した。

#### 4. 研究成果

##### 4-1. 術中MRI誘導下(ナビゲーション併用)脳腫瘍摘出術の手術工程・進捗解析システム

###### (1) ナビゲーションログによる工程分析

術野の解剖学的情報の中からステージング分析に有用な特徴情報を抽出し、治療中の術具位置ログデータと特徴情報の干渉を解析して各ステージに分割するアルゴリズムの開発を行った。昨年度行ったログデータからの分析に、解剖学的情報とログデータ分析結果を付加し、これを教師データとしたベイズ推定による脳腫瘍手術3工程(皮質切開、術中診断、腫瘍切開)の自動推定法を構築し、臨床8症例による評価を行った結果、平均73%の精度で作業工程の推定が可能であった。

###### (2) 標準工程データを利用した手術進捗・終了時刻予測

脳腫瘍摘出術20症例の分析の結果、腫瘍の大きさが手術時間に最も影響する要素であった。この統計データを元に標準摘出終了時刻を示す標準工程データを作成し、元に昨年度開発した手術終了時刻予測システムに導入して予測の高精度化を測ったところ、標準工程データを用いない従来手法に比べ予測誤差が約30%低減した。

##### 4-2. 複数の単眼 CCD カメラ映像を用いた手術室内3次元動線導出システムと導線を用いた工程の予測

###### (1) 複数単眼CCDカメラ映像と差分ステレオ法を応用した手術室内3次元動線導出システム

被験者2名が手術室内を異なる環境下で、複数の歩行パターンで歩く様子を記録し、3次元動線を計測した。また意図的にオクルージョンを発生させ、本システムによるオクルージョン回避が可能であるかを検討した結果、開発した推定アルゴリズムより動線推定を行うことで、オクルージョン回避が可能であ

った(図3).しかし,背景差分処理失敗等の複数要因が重なる場合,直線の方向性の差異やオクルージョン回避が失敗する場面が確認された.さらに複数人の歩行では動線の直線性は見られたが,差分処理失敗による複数動体の同一化も確認された.

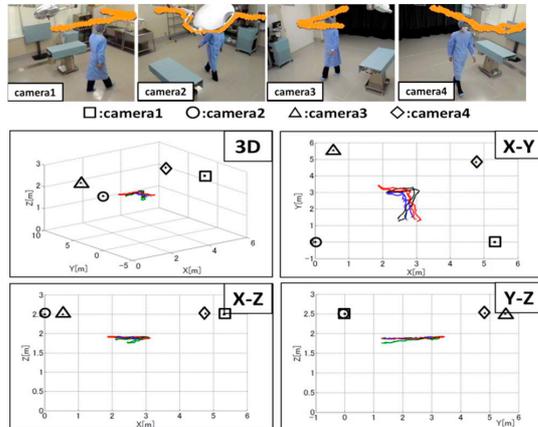


図3 オクルージョン回避アルゴリズムを用いた動線導出結果

## (2) 手術室内3次元動線を用いた工程予測

術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術における作業工程と動線の関係について特長を解析した.その結果,動線の長さにより得られる移動量と手術室入り口方向の動線を統計解析した際の偏差を分析することにより,開頭工程から術中MRI撮影工程への遷移,最終術中MRI撮影工程から閉頭工程への遷移タイミングに特徴的な動線解析値が得られることが明らかとなった.

### 4-3. 腹腔鏡下胆嚢摘出術の手術工程・進捗解析システム

開発したアルゴリズムを実装した腹腔鏡下胆嚢摘出術解析システムを図4に示す.ファントムを用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーション25症例を分析した結果,症例経験の多い医師は作業位置ログ分布が小さく密集し,また作業ターゲット周辺での作業時間は短い一方で術具移動速度は低く,作業を丁寧かつ無駄なく効率的に行っている可能性が定量的に示された.

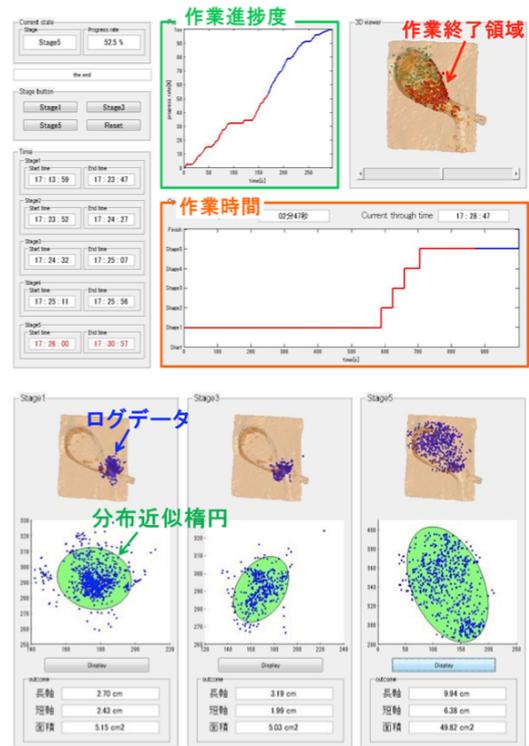


図4 胆嚢摘出術工程解析・評価システム

## 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3件)

- ① Ryoichi Nakamura, Tomoaki Aizawa, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Hiroshi Iseki, Automatic surgical workflow estimation method for brain tumor resection using surgical navigation information, Journal of Robotics and Mechatronics, 24(5):791-801, 2012
- ② 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋, 手術ナビゲーション情報を利用したMRI誘導下脳腫瘍摘出術の進捗工程解析法, 日本コンピュータ外科学会誌, 13(1):25-32, 2011 (2012年度論文賞(優秀症例賞))
- ③ 鈴木孝司, 櫻井康雄, 吉光喜太郎, 南部恭二郎, 村垣善浩, 伊関洋, "術室内映像を用いた潜在的リスク源候補半自動抽出システムの開発", 日本コンピュータ外科学会誌, 13(2):75-85, 2011

[学会発表] (計25件)

1. Ryoichi Nakamura, Medical Image Processing for Intuitive Navigation and Surgical Workflow Analysis, ICC Chiba Color Experts' day 2013, Chiba, Feb. 2, 2013(招待)

2. 中村亮一, 大塚亮, 杉野貴明, 川平洋, 五十嵐辰男, Wafles 環境とナビゲーション技術による次世代情報誘導内視鏡下手術への挑戦, 第 25 回日本内視鏡外科学会総会 特別ワークショップ「手術ナビゲーションはどこまで進化したか?」, 横浜, 12 月 8 日, 2012(招待)
3. Ryoichi Nakamura, Navigation-based intuitive guidance and analysis for robotics in minimally invasive surgery, Workshop on Future trends on Medical Robotics, IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob2012), Rome, Italy, June 24, 2012
4. 中村亮一, 手術ナビゲーション情報を用いた手術手技・環境の自動計測・分析・予測手法の開発, 第 51 回日本生体医工学会大会 シンポジウム「低侵襲治療技術・生活支援技術とコンピュータ支援技術の現状と将来」, 福岡, 5 月 10 日, 2012, 生体医工学 50(Supple1):82, 2012
5. R. Nakamura, T. Aizawa, Y. Muragaki, T. Maruyama and H. Iseki, Method for End Time Prediction of Brain Tumor Resections Using Analysis of Surgical Navigation Information and Tumor Size Characteristics, 2012 the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering (WC2012), Beijing, China, May26-31, 2012, IFMBE Proceedings 39, pp.1452-1455, 2012
6. 中村亮一, 大塚亮, 杉野貴明, 本多有芽, 川平洋, 子宮内及び等張液充填環境における革新的情報誘導内視鏡外科の創成 - WaFLES 技術による高速 3D リアルタイムナビゲーションと手術工程分析 -, オーガナイズドセッション「実学としての医工融合研究と医工ものづくりシステム」, 第 13 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 (SI2012), 福岡, 12 月 18-20 日, 2012
7. Takaaki Sugino, Hiroshi Kawahira, Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Analysis of the Surgical Workflow during Laparoscopic Cholecystectomy using Surgical Navigation Information, The 8th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Beijing, China, May27-28, 2012
8. 杉野貴明, 中村亮一, 川平洋, 手術ナビゲーションを作業記録装置として利用した腹腔鏡下胆嚢摘出術の手術工程解析法の提案と評価, 第 25 回日本内視鏡外科学会総会, 横浜, 12 月 6-8 日, 2012, 日本内視鏡外科学会雑誌 17(7):734, 2012
9. 中村亮一, 杉野貴明, 本多有芽, 相沢知明, 村垣善浩, 川平洋, 匠の技の定量化: ナビゲーション医療機器の手術環境評価への可能性, 第 21 回日本コンピュータ外科学会 シンポジウム「匠の技と先端技術の融合-医工連携の問題点-」, 徳島, 11 月 2-4 日, 2012, 日本コンピュータ外科学会誌, 14(3):182-3, 2012
10. 杉野貴明, 川平洋, 中村亮一, 手術ナビゲーションシステムを記録媒体として用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術の工程解析法, 第 21 回日本コンピュータ外科学会, 徳島, 11 月 2-4 日, 2012, 日本コンピュータ外科学会誌, 14(3):398-9, 2012
11. 大塚亮, 志村洋輔, 鈴木孝司, 佐藤生馬, 中村亮一, オクルージョンを考慮した複数カメラによる手術室内人員動線計測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMEC2012), 浜松, 5 月 27-29 日, 2012
12. 杉野貴明, 川平洋, 相沢知明, 中村亮一, ナビゲーション情報を利用した手術工程解析: 腹腔鏡下胆嚢摘出術への応用, 第 51 回日本生体医工学会大会, 福岡, 5 月 10 日-5 月 12 日, 2012, 生体医工学 50(Supple1):175, 2012
13. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Takashi Maruyama, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Method to estimate the end time of brain tumor resection by using surgical navigation information, 25th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2011), Berlin, Germany, June 22-25, 2011, Int J of CARS, 6(suppl1):S141-2, 2011
14. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 伊関 洋, 画像誘導下脳腫瘍摘出術における手術進捗工程解析 -推定標準作業時間を応用した手術進行予測と術中イベント自動検出法-, 第 20 回日本コンピュータ外科学会大会, 横浜, 11 月 22-24 日, 2011, 日本コンピュータ外科学会誌 13(3):262-3, 2011
15. 大塚 亮, 鈴木孝司, 佐藤生馬, 中村亮一, 複数カメラを用いたステレオ, 計測による手術室内人員動線分析システムの臨床データを用いた評価, 第 20 回日本コンピュータ外科学会大会, 横浜, 11 月 22-24 日, 2011, 日本コンピュータ外科学会誌 13(3):388-9, 2011
16. 鈴木孝司, 和泉清, 奈良温, 吉光喜太郎, 村垣善浩, 伊関洋, 術室内映像ファイルサイズによる動作量算出の定量的評価, 第 20 回日本コンピュータ外科学会大会, 横浜, 11 月 22-24 日, 2011, 日本コンピュータ外科学会誌 13(3):

- 382-3, 2011
17. 中村亮一, 大澤千晃, 鈴木孝司, 佐藤生馬, 複数カメラを用いたステレオ計測による手術室内人員動線分析に関する基礎的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011(ROBOMEC2011), 岡山, 5月26-28日, 2011, 抄録集 p180/論文集 2P1-C07 (CDROM)
  18. 大澤千晃, 中村亮一, 佐藤生馬, 単眼 CCD カメラ情報の連結による手術室内人員動線分析システムの開発, 第50回日本生体医工学会大会, 東京, 4月29日-5月1日, 2011, 生体医工学 49(Suppl):171, 2011
  19. Ryoichi Nakamura, Tomoaki Aizawa, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki, Intraoperative analysis of task progress and performance of glioma surgery using navigation information, 24th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2010), Geneva, Switzerland, June 23-26, 2010, Int J of CARS, 5(suppl1):S405-6, 2010
  20. Ryoichi Nakamura, "Quantitative visualization of surgical information in navigation surgery", Invited Talk, I2R-Chiba University JSPS Joint Workshop 2010 "Next Generation Bio-Medical Engineering", Fusionopolis, Singapore, 27-28 August 2010 (invited)
  21. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki, Process progress analysis method using surgical navigation information in glioma surgery, The 6th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Busan, Korea, Nov. 26-27, 2010
  22. Takashi Suzuki, Kitaro Yoshimitsu, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Development of video annotation system for microscopic and laparoscopic surgery, The 6th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Busan, Korea, Nov. 26-27, 2010
  23. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋, Progress process analysis method using surgical navigation information in brain tumor resection, 第49回日本生体医工学会大会, 大阪, 6月25-27日, 2010, 生体医工学 48(Suppl):166, 2010

24. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋, 術具・腫瘍干渉情報に基づく脳腫瘍摘出術の進捗工程解析, 第19回日本コンピュータ外科学会大会, 福岡, 11月2-4日, 2010, 日本コンピュータ外科学会誌, 12(3):430-431, 2010
25. 鈴木孝司, 吉光喜太郎, 村垣善浩, 伊関洋, 鏡視下手術およびトレーニングを支援するビデオアノテーションシステムの開発, 第19回日本コンピュータ外科学会大会, 福岡, 11月2-4日, 2010

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 手術工程解析プログラム

発明者: 中村亮一, 杉野貴明

権利者: 千葉大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-017956 号

出願年月日: 2013年01月31日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

手術情報収集と術式工程解析・進捗情報分析

[http://www.tms.chiba-u.jp/~nakamura/surg\\_info/proc\\_analy.htm](http://www.tms.chiba-u.jp/~nakamura/surg_info/proc_analy.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 亮一 (NAKAMURA RYOICHI)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30366356

### (2) 研究分担者

村垣 善浩 (MURAGAKI YOSHIHIRO)

東京女子医科大学・医学部・教授

研究者番号: 70210028

鈴木 孝司 (SUZUKI TAKASHI)

東京女子医科大学・医学部・助教

研究者番号: 00468688