

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03029

研究課題名(和文) 高度情報誘導・分析法を応用した次世代内視鏡下手術i-WaFLESの創成と確立

研究課題名(英文) Establishment of i-WaFLES - Innovative Endoscopic Surgery with advanced surgical infomatics

研究代表者

中村 亮一 (RYOICHI, NAKAMURA)

千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授

研究者番号：30366356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、治療部位への精密誘導治療を行う「軟組織に対応したリアルタイムナビゲーション技術」と、外科的手技における組織臓器へのダメージを低減する革新的な内視鏡下手術「水中手術“WaFLES”」の技術を統合的に研究開発し、「効用の最大化と副作用の最小化」を実現した次世代の超低侵襲精密外科医療技術を開発した。具体的には術前CT画像と術中3D超音波画像の術中レジストレーション法の開発とナビゲーションへの実装、内視鏡画像処理による臓器運動計測・補償を用いた精密レーザー照射システム、治療工程分析技術による手術環境・技能評価法と臨床教育手法の開発を達成した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed "Real-time Navigation Technique Corresponding to Deformed / Moving Organs" and "Water-filled LaparoEndoscopic Surgery (WaFLES)" which performs a precision-guided surgery that realized "Maximization of Outcome and Minimization of side effects".

Specifically, we developed (1) intraoperative registration method of preoperative CT image and intraoperative 3D ultrasound image and implementation on navigation, (2) precision laser irradiation system using measurement and compensation of organ motion by endoscopic image processing, (3) surgical environment / skill evaluation method and clinical education method by surgical workflow analysis and skill assessment.

研究分野：コンピュータ外科学

キーワード：手術ロボット 腹腔鏡下手術 運動補償 医用画像処理 水中手術

1. 研究開始当初の背景

疾患の治療において医療が追求する究極の形は、治療の主作用を最大化し副作用を最小化すること、すなわち治療部位のみをピンポイントに治療し、それ以外の組織臓器へのダメージを極限まで低減する「精密ターゲティング低侵襲治療」である。外科医療においても低侵襲的な手術操作、そして精密な誘導技術が求められ、これを支援する新しい術式・手術機器の研究が盛んに行われている。

水中手術 WaFLES：我々は新しい発想での次世代内視鏡外科手術として、体腔内を気体でなく等張液で灌流し術野を確保する等張液灌流式内視鏡下手術(Water-Filled LaparoEndoscopic Surgery, WAFLES)の術式開発を行なっている。これは(1)術中に体腔内臓器を空气中に晒すことなく液体灌流化で生理的体内環境の維持可能、(2)液圧による出血量の減少・還流による出血点の視認性向上など出血制御性の良さ、という従来の手術よりも生体への負担(副作用)を低減できる利点に加え、(3)灌流液を利用した臓器温度制御性の良さ、(4)空気層遮断による超音波利用性の良さなどの治療制御上のメリットをも持つ。一方で灌流液の制御、術野空間の確保、液中での良好な視界の維持などの課題も存在し、これらに対し我々は(4)の利点に着目し、従来の内視鏡下手術では不可能だった体外からの術中3次元超音波画像を利用したリアルタイムナビゲーションによる画像誘導下手術法の開発を研究主題の一つとしている。

ナビゲーション手術：画像誘導下に精密な治療を行う手術ナビゲーションは主として治療対象の位置同定・誘導路の設定に用いられこれまで脳神経外科・整形外科・耳鼻科・歯科など、術中の臓器移動・変形の少ない対象に対し術前画像を利用して用いられるものが主流であった。近年では臨床的に内視鏡下手術など胸腹部低侵襲治療でのナビゲーション利用の要望が高まっているものの、術中に容易に変形・移動する軟部組織を対象とした精密なナビゲーションの開発は現在も大きな研究課題である。臓器変形・移動に対応したナビゲーションの研究としては、数値モデルを用いたシミュレーションに基づく変形予測の利用や術中画像の利用、高品位な術前画像とリアルタイムの術中情報の統合などが行われているが、リアルタイム変形追従を臨床的・実用的に達成したナビゲーションはほぼ皆無である。我々は術中3次元超音波を利用したリアルタイムで腹腔内を広域誘導可能なナビゲーションの開発を進めている。術中超音波を用いたナビゲーションの研究は他でも行われているが、2次元の超音波画像を3次元的に利用した局所臓器内の限定的なナビゲーションが中心である。

我々は WaFLES 法の開発と共に、これら

次世代の低侵襲手術を実現するために不可欠な手術支援装置として低侵襲手術における画像誘導技術に関する開発研究に従事しており、特に脳腫瘍外科や腹腔鏡下手術における「近接覚」提示ナビゲーション、泌尿器領域における機能的画像提示手法の開発と実臨床への応用などを果たしてきた。この技術を踏まえ胎児外科手術を対象とした術中超音波を利用したナビゲーションの研究を実施し、この応用として腹腔内を子宮と同じく水で満たす水中手術の提案とナビゲーション応用を推進している。また画像誘導技術を応用した高度手術支援装置としてナビゲーション情報誘導下脳腫瘍レーザ手術ロボットシステムや、術中臓器運動情報の解析に基づく運動補償型ロボットシステムの研究を行っている。さらにこれらのナビゲーション手術環境における手術工程解析の試みとして、ナビゲーションを併用した低侵襲手術を対象として手技の進捗・操作状況を臓器モデルと術具操作ログにより分析し、治療工程および手技の定量的評価をおこなう「手術工程・技能評価システム」を開発し、脳腫瘍摘出術に臨床応用したほか、現在は腹腔鏡下手術臨床と訓練への応用研究を推進している。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの等張液灌流式内視鏡下手術(WaFLES)法、画像誘導技術・画像誘導高度手術支援システム、手術工程解析技術の研究成果を踏まえ、低侵襲性の向上とそれに伴う弊害をクリアする支援装置の連携により構築される「腹部外科治療における究極の精密ターゲティング低侵襲治療」の創成と確立を目指し、統合的な画像情報誘導・術中情報分析システムを医工学的見地から開発することを目的とする。具体的には、①3次元超音波と高品位医用画像の高速フュージョンによる3Dナビゲーション、②内視鏡等映像情報に基づく術中3次元臓器運動計測と運動補償法、③ナビゲーションと運動補償情報に基づく高精度水中温度治療システム、④ナビゲーションと映像情報を元にした治療工程分析技術による手術環境・技能評価法の4つの基盤技術の研究を実施し、これら術中(intraoperative)・画像誘導(image-guided)・統合(integrated)技術による精密で安全な WaFLES, “i-WaFLES” の確立を目指す。

3. 研究の方法

等張液灌流式内視鏡下手術(WaFLES)の利点について、研究目的の項において(1)液体灌流による生理的体内環境の維持、(2)液圧・液流による出血のコントロール性、(3)臓器温度制御性の良さ、(4)空気層遮断による超音波利用性の良さなどを挙げたが、同時にこの術式には内視鏡の視野の狭さに加え灌流液の混濁等による視野の悪化、超音波診断画像の画質が不十分、などの問題も存在す

る。次世代内視鏡外科手術分野の主題である低侵襲性の向上とこれまでの研究成果を基盤とし、これら WaFLES 法の利点と弱点を踏まえ、本研究では、

- ① 3次元超音波と術前高品位医用画像の高速フュージョンによる3Dナビゲーション
- ② 内視鏡等映像情報に基づく術中3次元臓器運動計測と運動補償法
- ③ ナビゲーションと運動補償情報に基づく高精度水中温度治療システム
- ④ ナビゲーションと映像情報を元にした治療工程分析技術による手術環境・技能評価法

の4つの技術開発を通じた i-WaFLES 法の確立を目指した。

① 3次元超音波と術前高品位医用画像の高速フュージョンによる3Dナビゲーション

異種画像間高速剛体レジストレーション法の開発研究として、CTデータからの仮想超音波画像作成シミュレーション技術を元にした術前CT画像と術中3D超音波画像の術中レジストレーション法の開発とナビゲーションへの実装を行った。本ナビゲーションシステムの実現において必要な高精度で高速な術中US-CT画像レジストレーションを実現するために、本研究では術前CT画像から仮想超音波(vUS)画像を作成し、このvUS画像と術中US画像を正規化相互情報量を類似尺度としてPowell法と多重解像度画像による画像レジストレーションを行った。vUS画像作成においてはGPGPUによる高速並列演算を用い、術中に利用可能な計算時間が達成可能かについて検討した。

② 内視鏡等映像情報に基づく術中3次元臓器運動計測と運動補償法

内視鏡映像(30fps)により計測した実時間臓器運動に基づく2次元臓器運動モデルの構築とこのモデルを用いた運動予測による追従精度・遅延補償法の開発を行った。

本研究では臓器表面の運動を計測し運動を補償する手法として、まずPyramidal Lucas-Kanade法によるオプティカルフローによる画像特徴点の移動量推定において画像中のマニピュレータ領域・ハレーション領域内に進入した特徴点を除外する手法を導入した。計測結果を直接誘導に用いた場合、内視鏡のような低フレームレートのセンサ情報を用いた場合、計測と制御における時間遅れにより運動追従に遅れが生じ正しい位置補正が出来ない。そこで移植操作実行前の心臓の運動計測結果から心表面運動の2次元フリーエモデルを作成し、このモデルによる運動予測とリアルタイム計測結果を制御に導入することによってより正確な臓器運動

追従による移植術具の誘導を実現した。

また前述の画像特徴点計測に加え、Guided Filterを用いた非線形スケール空間によるWaFLES腹腔内臓器局所特徴量検出アルゴリズムを提案し実装した。

③ナビゲーションと運動補償情報に基づく高精度水中温度治療システム

WaFLES環境でのレーザー焼灼について組織学的な検討を行ないつつ、精密自動処置の対象と有用性をさらに明確にしなが画像誘導下WaFLESレーザー手術ロボットを開発した。②の臓器運動計測補償技術を用い、手術用レーザープローブを保持する2自由度ロボットを揺動する照射対象を追従するように制御し、正確なレーザー照射と止血操作が可能であるか検討を行った。

④ナビゲーションと映像情報を元にした治療工程分析技術による手術環境・技能評価法

本研究では、新規治療技術の有用性を客観・定量評価するための評価手法として、治療工程分析技術による手術環境・技能評価法を開発する。内視鏡下手術における手術工程分析法として、ナビゲーションシステム情報及び内視鏡映像情報を元にした鉗子運動情報の推定と技量評価指標の定義を行い、良好な手術工程・技術データの特徴を技量評価指標の特徴から評価すると共に、手術工程の時間進行を表現する手術プロセスモデル(SPM)を技量評価指標群の時系列配列として定義し、その分析により手術環境技能評価を行う基礎的手法を開発した。

4. 研究成果

① 3次元超音波と術前高品位医用画像の高速フュージョンによる3Dナビゲーション

本手法を用いたUS-CTレジストレーションの精度と計算速度を寒天と炭素粉末により作成した肝臓ファントムを用いて検証した結果、平均誤差 3.41 ± 1.19 mm、平均計算時間 10.31 ± 0.96 秒となった。更なる精度向上・高速化が必要ではあるものの、一定の臨床条件下では現実的に術中での使用が可能である範囲での性能が認められた。またブタを用いたin vivo実験では、術中超音波による実時間誘導が可能ナビゲーションにおいて、アーチファクト発生により超音波画像による誘導が困難な状況において超音波画像に対応した術前CT画像を提示することにより超音波プローブの操作方向や解剖把握の補助が行えた。

② 内視鏡等映像情報に基づく術中3次元臓器運動計測と運動補償法

③ナビゲーションと運動補償情報に基づく高精度水中温度治療システム

WaFLES環境でのレーザー焼灼について組織学的な検討を行ないつつ、精密自動処置の対

象と有用性をさらに明確にしながら画像誘導下 WaFLES レーザ手術ロボットの構築を開始すると共に、内視鏡下での「自動縫合運針」ロボットの可能性について研究を進めた。

WaFLES レーザ手術ロボット: 腹腔内で灌流環境下に平面内揺動する物体に対し誤差 1.15mm 程度での正確なレーザー照射が可能な WaFLES レーザ手術ロボットの基礎開発を達成した。

自動縫合運針ロボット: WaFLES 環境下で呼吸動あるいは水流により揺動する臓器の運動を補償しつつ外科縫合用糸針を正確に運針する WaFLES 支援自動縫合システムの開発を行った。運動補償精度として誤差 0.20±0.11mm を達成した。

④ナビゲーションと映像情報を元にした治療工程分析技術による手術環境・技能評価法

- (ア) 工程の比較評価に置いて、作業を行っている解剖学的な位置情報を元にした手術プロセスモデル配列アライメントのマッチングを行う手法を開発し、患者の個体差により計測・分析条件が変動する臨床環境下においても有用な手術作業工程の定量的な比較評価を可能とした。
- (イ) 主成分分析を用いて熟練医と研修医の技術特徴を評価し、両群に特徴的な差異を認める技量指標の存在を明らかにした。
- (ウ) これまでの技量分析評価の結果を基に、術者の技量を多角的な指標でフィードバックする教示システムを試作した。偏差値をベースとしたスコア提示とレーダーチャートによる技量特徴毎の優劣を提示するアプリケーションを開発した。
- (エ) 訓練時の手術プロセスモデル(データ配列)を動的時間伸縮法を用いて比較し、手本となる熟練医のモデルと大きく手技内容が異なる場所を自動抽出し、改善のポイントを明示するシステムを開発した。

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5件)

- ① 中村亮一, 超音波診断画像を用いたナビゲーション誘導下低侵襲治療の現状と未来, 特集 超音波診断・治療支援システム開発の最先端, 超音波医学, 45(2):159-166, 2018
<http://doi.org/10.3179/jjmu.JJMU.R.92>
- ② 中村亮一, レーザ技術を用いた低侵襲手術ロボット, OPTRONICS, 36(12):68-71, 2017

<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php?year=2017&month=12>

- ③ 中村亮一, 五十嵐辰男, 手術ナビゲーション, 腎臓内科・泌尿器科, 5(5):518-523, 2017
<http://www.kahyo.com/item/N201705-055>
- ④ 中村亮一, 正宗賢, 手術ロボット・マニピュレータの研究開発動向, 日本コンピュータ外科学会誌, 18(3):139-142, 2016
<http://doi.org/10.5759/jscas.18.139>
- ⑤ 杉野貴明, 久保木章仁, 中山次久, 大村和弘, 浅香大也, 山口智子, 小島博巳, 鴻信義, 中村亮一, ナビゲーション情報を利用した内視鏡下副鼻腔手術における内視鏡操作の定量分析, 日本コンピュータ外科学会誌, 17(4):333-342, 2015
<http://doi.org/10.5759/jscas.17.333>

[学会発表] (計19件)

- ① Ryoichi Nakamura, Intuitive Visualization and Optimization of Surgery based on Anatomy and Workflow information inside OR: New Strategy on Image-guided Surgery, International Conference on Intelligent Informatics and BioMedical Science 2017 (ICIIBMS2017), Okinawa, Japan, Nov. 24-26, 2017
- ② 林亮太, 中村亮一, 安全なロボット手術のための弾性リトラクタを用いた臓器圧排力計測手法の検討, 第30回日本内視鏡外科学会総会, 京都, 12月7-9日, 2017, SF078-02
- ③ 松永佳久, 石井琢郎, 中村亮一, 五十嵐辰男, 人工腹水灌流下ミニマム創内視鏡下手術における体腔外設置型水槽の開発, 第30回日本内視鏡外科学会総会, 京都, 12月7-9日, 2017, EP127-06
- ④ Mika Kontto, 中村亮一, 水中手術(WaFLES)における組織変形追従のための局所特徴量抽出アルゴリズムの構築, 第26回日本コンピュータ外科学会大会, 名古屋, 10月28-30日, 2017, 日本コンピュータ外科学会誌, 19(4):273, 2017
- ⑤ 松永佳久, 五十嵐辰男, 中村亮一, 等張液灌流式腹腔鏡下手術における体腔外設置型水槽の開発, 第26回日本コンピュータ外科学会大会, 名古屋, 10月28-30日, 2017, 日本コンピュータ外科学会誌, 19(4):372, 2017
- ⑥ Tomoko Yamaguchi, Ryoichi Nakamura, Development of a laparoscopic training system with quantitative skill assessment and learning support module, The 13th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2017), Chang Bin, Taiwan, Nov. 26-28, 2017
- ⑦ Seiya Aoki, Naoki Fukatsu, Tomoko

- Yamaguchi, Munenori Uemura, Makoto Hashizume, Ryoichi Nakamura, Quantitative evaluation of endoscopic intestinal suture training using time series process analysis, The 13th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS2017), Chang Bin, Taiwan, Nov. 26-28, 2017
- ⑧ Ryoichi Nakamura, Intuitive Visualization of Anatomy and Workflow inside OR: New Strategy on Image-guided Surgery, THE FIRST IU-CU WORKSHOP FOR COMPUTER SCIENCE AND BIOMEDICAL ENGINEERING, The INTERNATIONAL UNIVERSITY - HO CHI MINH NATIONAL UNIVERSITY, Ho Chi Minh City, Vietnam, June 14, 2016 (Keynote Lecture)
- ⑨ H. Nakata, R. Nakamura, Organ Motion Tracking System for Laser Surgical Robot System in Water-Filled Laparo-Endoscopic Surgery, The 30th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2016), Heidelberg, Germany, June 21-25, 2016, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 11(suppl):S238-9, June 2016
- ⑩ 中田浩之, 中村亮二, 等張液灌流式腹腔鏡下手術のための臓器運動追従型レーザー手術ロボットシステムの開発 - 水中運動物体に対するレーザー照射精度の評価 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016(ROBOMECH2016), 横浜, 6月8-10日, 2016, 1A2-02b5
- ⑪ 中村亮二, Pham Duc Tai, 中田浩之, 森崎桂太, 杉野貴明, 伊藤夏織, 吉村拓司, 林優希, 川平洋, 五十嵐辰男, 術中診断・映像の取得・分析・提示による新たな軟性臓器ナビゲーション手術“i-WaFLES”の創成, 第104回日本泌尿器科学会総会 PP企画16 シンポジウム “画像診断が外科手術を変える”, 仙台, 2016年4月25日(招待講演)
- ⑫ ファムドックタイ, 五十嵐辰男, 中村亮二, 人工腹水灌流下手術(WaFLES)における術中3D超音波画像とCT画像の統合表示を利用したナビゲーションの構築, 第28回日本内視鏡外科学会総会, 大阪, 12月10-12日, 2015, 日本内視鏡外科学会雑誌, 20(7):OS251-2, 2015
- ⑬ Hiroyuki Nakata, Ryoichi Nakamura, Organ Motion Tracking System for Laser Surgical Robot System in Water-Filled Laparo-Endoscopic Surgery -Development and Evaluation of Organ Motion Measurement System-, 2015 International Symposium on Info Comm and Media Technology in Bio-Medical and Healthcare Application(IS-3T-in-3A), Chiba, Japan, Nov.15-18, 2015, p82
- ⑭ Tomoko Yamaguchi, Takaaki Sugino, Hiroshi Kawahira, Ryoichi Nakamura, Proposal and evaluation of surgical process analysis based on left handwork information in laparoscopic surgery using surgical navigation system, The 11th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Singapore, 9-11 July, 2015, ID15
- ⑮ T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, Surgical task evaluation by an operational region analysis during laparoscopic cholecystectomy using navigation system information, The 29th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2015), Barcelona, Spain, June 24-27, 2015, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 10(suppl):S115-6, June 2015
- ⑯ T.D. Pham, T. Igarashi, R. Nakamura, Surgical navigation system with fusing visualization of 3D ultrasound and CT image for water-filled laparo-endoscopic surgery, The 29th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2015), Barcelona, Spain, June 24-27, 2015, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 10(suppl):S56-7, June 2015
- ⑰ 林優希, 五十嵐辰男, 中村亮二, 等張液灌流式腹腔鏡下手術用3次元空間確保リトラクタの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(ROBOMECH2015), 京都, 5月17-19日, 2015, 1A1-F10
- ⑱ 中田浩之, 中村亮二, 五十嵐辰男, 等張液灌流式腹腔鏡下手術のための臓器運動追従型レーザー手術ロボットシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(ROBOMECH2015), 京都, 5月17-19日, 2015, 1A1-D05
- ⑲ 中村亮二, 杉野貴明, 川平洋, 伊藤夏織, 鈴木啓太, 五十嵐辰男, 術中画像情報処理に基づく外科治療の可視化と最適化, 第54回生体医工学会大会 オーガナイズドセッション15「生体医用画像工学の新潮流」, 名古屋, 5月8日, 2015(指定講演)

- ① 五十嵐辰男, 納谷幸男, 中村亮一, 灌流下鏡視下手術(水中手術)とミニマム創手術の親和性, ガスレス・シングルポート泌尿器手術 基礎・上級編, 木原和徳編著, 医学図書出版, 東京, 2018, pp180-183
- ② 中村亮一, 5-4 手術支援ロボット (第5章 ロボット), テクノロジー・ロードマップ 2018-2027 全産業編, 日経 BP 社, 東京, 2017, pp204-207
- ③ 中村亮一, 4-4 手術支援ロボット (第4章 ロボット), テクノロジー・ロードマップ 2017-2026 全産業編, 日経 BP 社, 東京, 2016, pp200-203
- ④ 中村亮一, 2-18 手術支援ロボット (第2章 医療 2-3. ビジネス機会の拡大), テクノロジー・ロードマップ 2016-2025 医療・健康・食農編, 日経 BP 社, 東京, 2015, pp238-241
- ⑤ 中村亮一, 杉野貴明, 伊藤夏織, 川平洋, 五十嵐辰男, 手術ナビゲーションによる解剖と手技の可視化, メディカル&イメージング No.2, オプトロニクス社, 東京, p36-42, 2015

[その他]

ホームページ等

- ① 画像誘導によるレーザ手術ロボットシステム
http://www.cfme.chiba-u.jp/~nakamura/surg_dev3.html
- ② 3D 超音波リアルタイムナビゲーションシステム
http://www.cfme.chiba-u.jp/~nakamura/surg_navil.html
- ③ 千葉大学フロンティア医工学センター 水中腹腔鏡下手術プロジェクト
<http://www.cfme.chiba-u.jp/~wafles/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 亮一 (NAKAMURA, Ryoichi)
千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授
研究者番号：30366356

(2) 研究分担者

五十嵐 辰男 (IGARASHI, Tatsuo)
千葉大学・フロンティア医工学センター・特任教授
研究者番号：70302544

川平 洋 (KAWAHIRA, Hiroshi)
千葉大学・フロンティア医工学センター・准教授
研究者番号：90447285