

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20713

研究課題名(和文) ロボット支援腎部分切除におけるAR手術ナビゲーション開発・臨床導入

研究課題名(英文) AR surgical navigation development and clinical introduction in robot-assisted partial nephrectomy

研究代表者

チョ ビョンヒョン(Cho, Byunghyun)

九州大学・先端医療オープンイノベーションセンター・特任助教

研究者番号：20734528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小径腎癌に対してロボット支援腎部分切除術(RAPN)における内視鏡画像上では脂肪や腎実質に埋もれた腎動脈や腫瘍を3D画像で可視化し、開発したシステムは観察研究として臨床現場でも応用ができ、術者に3D情報をフィードバックすることで安心・安心で手術を行うことが確認できた。本研究開発成果については、第71回日本泌尿器科学会西日本総会、第32回日本内視鏡外科学会総会、第30回九州内視鏡・ロボット外科手術研究会、CARS2019で報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、小径腎癌に対してロボット支援腎部分切除術(RAPN)における内視鏡画像上では脂肪や腎実質に埋もれた腎動脈や腫瘍を3D画像で可視化するため、拡張現実を使用したロボットの手術ナビゲーションシステムを開発している。内視鏡に各々装着し光学式追跡システムで内視鏡の動き(位置情報)を計測し、その情報をベースに3画像を自動で動かし、かつ内視鏡画像にその3D画像を重畳させ、術者はコンソール(Tile Pro)内に画像提示された3D情報をフィードバックすることでより安全・安心で手術を行うことができ、時間短縮などで合併症の低減に貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Nephron-sparing surgery, such as robot-assisted partial nephrectomy (RAPN), for small renal tumors has been reported to yield excellent functional and oncological outcomes. While RAPN is becoming one of the standard treatments, the procedure is becoming more complex as it requires surgeons to resect the tumor and suture the kidney surface within the limited warm ischemic time (WIT) as quickly as possible after identifying and clamping the renal artery. In this study, we employed an surgical system during RAPN that synchronizes real-time endoscopic images with a 3D model in virtual reality (VR). We assessed whether this image-support system improves the surgical procedure by focusing on connected motions at the phase of identifying a renal artery. These results were reported to The 71st Annual Meeting of West Japan Urological Association, The 32nd Annual Congress of Japan Society for Endoscopic Surgery, The 30th kyushu Society and Endoscopic and Robotic Surgery and CARS2019.

研究分野：医療画像処理

キーワード：ロボット支援腎部分切除術 ナビゲーション 仮想現実 拡張現実

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

7cm以下の小径腎腫瘍に対してロボット支援腎部分切除術(RAPN)は標準的治療の1つであり、RAPNの最も重要な目的は腎腫瘍の完全切除かつ術後腎機能温存である。術後腎機能は、腫瘍切除時の腎動脈遮断時間(温阻血時間(WIT))、術前の腎臓の状態と正常腎実質組織温存量に依存する。ロボット手術の普及に伴いWIT短縮は限界に達し、術前腎臓の状態は患者の基礎疾患に起因する。このため、術後腎機能は腫瘍切除時の腎実質組織温存量が重要となる。RAPNの症例増加に伴い、腎動静脈本幹に接して出血のリスクが高い腎門部腫瘍や腎表面からは同定できない完全埋没型腫瘍など高難易度の症例や、腎機能温存が必須な単腎や慢性腎機能障害の有する腎癌症例が増加している。これらの症例も含めRAPN自体が高度な手術技術が求められるが、手術の安全性や制癌性を備えた画像支援システム開発は研究段階で普及していないのが現状である。我々は先行研究として光学式追跡システムを用いてda Vinci内視鏡の動きを追跡し、術前CT画像から作成した腎癌3Dモデル(VR)が内視鏡の動きと連動するプログラムを泌尿器科と共同開発した。このプログラムを実装した自動追従型手術ナビゲーションシステムを2016年よりRAPNに臨床導入したが、術野情報をナビゲーション画面に反映されていない参照画像であり、内視鏡画像と3Dモデル間をマニュアルの位置合わせによって生じる誤差 Target region error (TRE)は $7\pm 2\text{mm}$ と大きく、術中解剖学的情報を誤って認識する可能性があった。

拡張現実(AR)技術を使用すれば腫瘍位置を高精度で認識し、他の臓器へ注意しながら腎腫瘍を完全切除かつ正常腎実質をより多く温存できる可能性があるため、AR技術は合併症予防と術後腎機能温存に直結する可能性がある。本研究では、高精度(TRE:1mm以下改善)開発とda Vinci内視鏡(ステレオカメラ)からの3D画像に3Dモデル(VR)を重ねさせるAR技術開発し、新たなARナビゲーションを提案していく。これまでにない、高機能を備えた画像支援システム開発によって新規需要を創出することは、ロボット手術の付加価値を高め我が国の医療機器開発において優位性を維持するためにも重要な領域である。

2. 研究の目的

本研究は、ARの技術によって内視鏡画像に直接解剖学的情報(腎動脈や腎腫瘍)を付加することで、①より直感的なAR手術ナビゲーション開発、②腎腫瘍切除時により多くの正常腎組織を温存できるか、術前後のCT画像で腎体積を評価、③術後腎機能への影響を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 手術ナビゲーションシステム

手術前の1mmスライスの造影CT画像から3Dソフトウェア(3D Slicer, Version4, Brigham and Women's Hospital, Boston, MA, USA)を用いてセグメンテーションを行い、腎臓、動脈、静脈、尿路、腎腫瘍を個別に3Dモデルを作成した。

3.1.1 Hand-eye キャリブレーション

2D内視鏡画像と3D現実世界との関係を表すホモグラフィ行列は、行列M(焦点距離と主点をパラメータとするカメラ固行列)と行列W(カメラレンズとチェスボードの座標間の回転と平行移動を含むカメラ外部行列)から構成される。 0° と 30° da Vinci内視鏡とチェスボード(1マス:2cmx2cm)に光学式マーカーを装着し、光学式追跡システム(Polaris Spectra; NDI, Waterloo, Canada)でOpen computer visionライブラリとZhang.Zの方法からキャリブレーションを行、内視鏡のパラメータを測定し T_C^{CM} を計測した。

3.1.2 AR: Paired-point registration 方式

先のキャリブレーションと T_C^{CM} より、CT画像の光学追跡システムと3Dモデルとの間のマトリックス T_I^C を計算した。以上の計算式より、3D画像の腎腫瘍の情報と内視鏡画像

の腎腫瘍の位置合わせすることで、腫瘍の切除範囲(3Dモデルの情報)を内視鏡画像に重畳しARを実現させた。実際の内視鏡画像を重畳させるために3Dモデル内における腎動脈、腎腫瘍等の特徴点3-5箇所の任意の箇所を選択し、内視鏡キャプチャ画像から同部位を同定しペアリングさせた。

3.2 ファントムテスト・動物実験

[ファントム実験]

ポリ塩化ビニルアルコールから3Dプリンタで作成した腎癌3Dモデルを用いて、Paired-point registration方式の精度を評価した。

[In vivo 実験]

ブタ腎臓を用いて、ファントムで作成した腎癌モデルと同様の直径10mm腎腫瘍を人工的に作成し、同様の手順で内視鏡画像内に3Dモデルを重畳させた。

3.3 RAPN への臨床導入

本研究は九州大学病院臨床研究センター及び学内の倫理審査委員会の承認を受けて実施している(承認番号28-119)。本システム確立後にRAPNへ臨床導入する。ARシステムを実装した手術ナビゲーションのワークステーションから出力された画像信号をda Vinci SiのTile Pro機能を経由してサージョンコンソール画面にAR画像、VR画像と内視鏡画像を統合させた。AR画像については、腎腫瘍の3D画像を内視鏡に重畳させた。

3.4 評価方法

腫瘍切除前に通常術中超音波での切除予定部位と、AR画像を内視鏡画像に重畳させて見える腫瘍3D画像の辺縁部位を、ロボット鉗子で電気凝固してマーキングした。摘出病理標本に断面を入れ、超音波を用いて決定された切除ライン(切除断端)とARを用いて決定された腎皮膜の凝固部位から腫瘍までの距離を計測した。

4. 研究成果

3.2で実施したファントム実験では、内視鏡に見立てたステレオカメラを作成し、Point Pair Matching Registration法で、3D画像を作成した脊椎骨盤モデルと腎癌モデルに重畳させた。これによるTREは $1.0 \pm 0.5\text{mm}$ であった(図1)。その後の豚腎で同様のregistration方法の精度評価ではTREは $2 \pm 1\text{mm}$ であった。これは、豚腎の3D画像は作成せずに、豚腎が投影された内視鏡画像上から任意の点のみを抽出したregistration方法であったため、誤差が大きくなった。

これらの検証を踏まえ、実際のRAPNに導入した(倫理審査委員会承認番号28-119)。

まずARナビゲーションシステムを搭載したワークステーションをda Vinci SiサージョンコンソールにHDMIケーブルを経由してサージョンコンソールビュー画像共有ソフトTile Proに接続した。これによりTile Proを介して術者はリアルタイムにARナビゲーション画面を確認することが可能となった(図2)。

ARナビゲーションの精度を評価するために、腎腫瘍3D画像を内視鏡画像上で視認される腎腫瘍に重畳させてARナビゲーションを実施した。以下の手順でナビゲーションを進め、ARナビゲーションの精度を検証した。

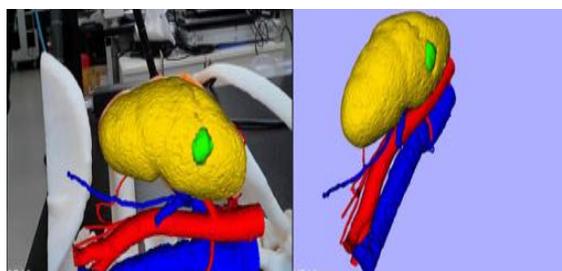


図1.ファントム実験
3Dプリンタで作成した1/1スケールの脊椎骨盤モデルと、ポリ塩化ビニルアルコールで作成した腎癌モデルを配置し、Point Pair Matching registrationで、内視鏡画像に3D画像を重畳させた。これによる誤差は、1mm程度であり、高い精度を確認した。



a) AR画像を用いた切除ラインの決定 b) ARナビゲーション画像

図2. ARナビゲーション併用したRAPN

a) サージョンコンソール・メインビュー: 術者はコンソール画像に投影されたAR画像を参照しながら腎腫瘍3D画像と内視鏡画像との境界線をロボット鉗子で電気凝固してマーキングした。
b) ARナビゲーション画像: 内視鏡画像に投影された腎腫瘍3D画像(緑色)を確認した。腎臓3D画像が投影されると鉗子が3D画像で覆われて視認しづらくなったため、腎臓3D画像はラインで表示(赤色の線)させた。

AR: augmented reality, RAPN: robot-assisted partial nephrectomy

1. 腎腫瘍の剥離を開始し、腎皮膜表面が視認できた時点で内視鏡画像をワークステーション上でキャプチャーした。このキャプチャー画像上の任意の特徴点を5箇所決定し、3D画像上と同じ場所をリンクさせた(Point pair matching registration)。
2. 術者はARナビゲーションを参考にし、腎腫瘍の切除範囲を決定するため術中超音波検査(L43超音波プローブ)で腎腫瘍と正常腎実質の境界を確認し切除ラインをロボット鉗子の電気凝固にてマーキングした。同時に、ARナビゲーション画像から腎腫瘍3D画像の辺縁をロボット鉗子の電気凝固でマーキングし、ARナビゲーションの切除ラインとした。
3. 術者には従来の術中超音波検査によって決定されたラインで腫瘍を切除した。摘出標本に喝面を入れて、直ちにホルマリン固定し病理組織検査に提出した。
4. HE染色にて腎実質を一部含む腎腫瘍の標本から、腎皮膜の切除断端とARナビゲーションで作成する際にできた腎皮膜の熱変性部位をARナビゲーションの切除ライン予定ラインとして同定した(図3)。ARナビゲーションシステムにおける、3D画像と内視鏡画像とのTREは平均 1.2 ± 0.5 mm程度と高い精度を確認した。

ARナビゲーション

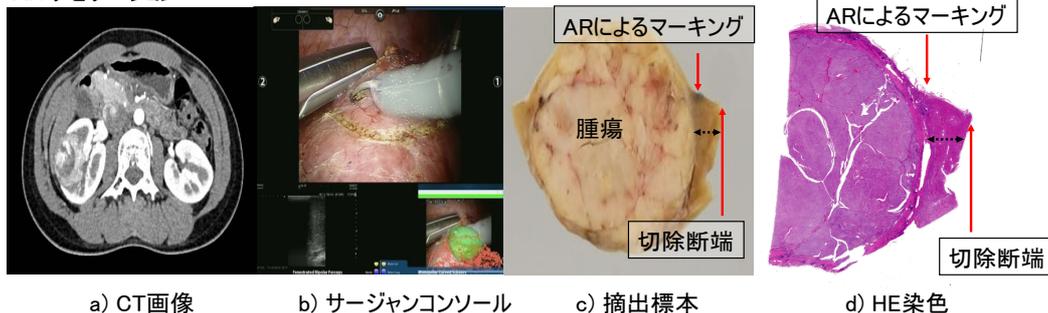


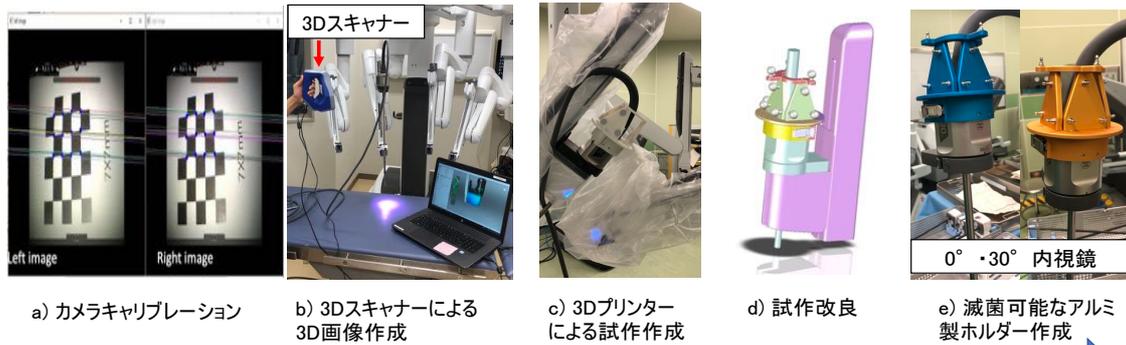
図3. ARナビゲーションシステムの評価

- a) 3cm右腎腫瘍に対して右経腹膜アプローチによるRAPNを実施した。
 - b) サージョンコンソール内では術中超音波画像とARナビゲーション画像とを並列で提示した。
 - c) 摘出標本の喝面からも術中にARナビゲーションを参考にして作成したマーキングを肉眼的に確認できた。
 - d) HE染色にて腫瘍辺縁に熱変性を伴う腎皮膜を確認し、ARナビゲーションによるマーキングとして同定した。ARナビゲーションは腫瘍の辺縁を正確にとられることが可能であることが示唆された。
- AR; augmented reality, RAPN; robot-assisted partial nephrectomy

2020年より研究実施施設の手術支援ロボット da Vinci Surgical System (dVSS) SiがdVSS Xiに変更となり、内視鏡システムの刷新に伴い内視鏡のパラメーターや光学式追跡システムに使用するアタッチメント一式を以下の手順で刷新した(図4)。

- a) 7x7mmのチェスシートを用いて内視鏡の外部パラメータ(内視鏡の位置、向き)、内部パラメータ(光学的中心点、歪み、焦点距離、アスペクト比率)を 0° 内視鏡、 30° 内視鏡毎に計測した(図4)。
- b) 3Dスキャナーを用いて、dVSSXiのロボットアーム、内視鏡をスキャンし寸法を計測した。スキャンデータにより3D画像を作成した。
- c) b)の情報を元にロボットアームに干渉しない内視鏡ホルダーの3D画像を作成し、この画像のSTLファイルから3Dプリンタを用いてモデルを製作した。3Dモデルを内視鏡に装着し、 30° 内視鏡のローテーション機能を発動した際にロボットアームにこのホルダーが衝突しないことを確認した。
- d) さらにVirtual Reality(VR)上でデザインを変更し、光学式追跡システムを使用した場合に3D画像内の光学式マーカーが視認できるかシミュレーションを行い、変更を追加した。
- e) 滅菌可能なアルミ製内視鏡ホルダーを作成し、RAPNへ導入した。

上記の如く、内視鏡ホルダーを作成し、dVSS Xiに向けたARナビゲーションシステムの改良を現在も継続している。



作業工程

図4. da Vinci surgical system (dVSS) Xi専用内視鏡ホルダー作成.

- 7x7mmのチェスシートを用いて内視鏡の外部パラメータ(内視鏡の位置、向き)、内部パラメータ(光学的中心点、歪み、焦点距離、アスペクト比率)を0°内視鏡、30°内視鏡毎に計測した。
- 3DスキャナーでdVSSのロボットアーム、内視鏡の寸法を測定し、3D画像を作成。
- 3Dプリンターで試作品を作成し、ロボットアームとの干渉を評価。
- 光学式マーカーの配置を検討し、3D画像上でシミュレーションを実施して試作改良を実施。
- 滅菌可能なアルミ製ホルダーを0°内視鏡、30°内視鏡別に作成しRAPNに導入。

dVSS: da Vinci surgical system、RAPN: robot-assisted partial nephrectomy

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kobayashi Satoshi, Cho Byunghyun, Mutaguchi Jun, Inokuchi Junichi, Tatsugami Katsunori, Hashizume Makoto, Eto Masatoshi	4. 巻 204
2. 論文標題 Surgical Navigation Improves Renal Parenchyma Volume Preservation in Robot-Assisted Partial Nephrectomy: A Propensity Score Matched Comparative Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Urology	6. 最初と最後の頁 149 ~ 156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1097/JU.0000000000000709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小林聡、Byunghyun Cho, 立神勝則、橋爪誠、江藤正俊
2. 発表標題 Development of next-generation surgical navigation system in Robot-assisted partial nephrectomy
3. 学会等名 第71回西日本泌尿器科学会総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林聡、Byunghyun Cho, 立神勝則、橋爪誠、江藤正俊
2. 発表標題 RAPNへの拡張現実 Augmented Reality手術ナビゲーションシステム開発
3. 学会等名 第32回日本内視鏡外科学会総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Kobayashi, B. Cho, K. Tatsugami, H Honda, M, P. Jannin, M. Hashizume, M. Eto.
2. 発表標題 Assessment of surgical skills by using surgical navigation in robot-assisted partial nephrectomy
3. 学会等名 33st International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery. France (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林聡、Deokgi Jeung、Byunghyun Cho、牟田口淳、 柏木英志、武内在雄、塩田真己、猪口淳一、Jaesung Hong、江藤正俊
2. 発表標題 ロボット支援腎部分切除術における拡張現実を用いた次世代型手術ナビゲーション開発
3. 学会等名 第 30 回九州内視鏡・ロボット外科手術研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------