

診断機器情報を活用した術中動態対応型手術支援技術

Advanced surgical devices with motion compensation technologies
using intraoperative diagnosis information

○ 中村亮一（千葉大） 山本優希（千葉大） Pham Duc Tai（千葉大）

中田浩之（千葉大）， 五十嵐辰男（千葉大）

Ryoichi NAKAMURA, Chiba University
Yuki YAMAMOTO, Chiba University
Duc Tai PHAM, Chiba University
Hiroyuki NAKATA, Chiba University
Tatsuo IGARASHI, Chiba University

Abstract: Major problems on establishing clinical application of navigation therapy is to treat the motion and deformation of patient organ during surgery. We investigate the motion compensation technology for navigation surgery from the views of clinical needs and technological seeds. In this paper, we introduce our new approach and technologies for novel assistive technologies of motion compensation in minimally invasive surgery, which is developed by clinically affordable sensing and controlling technologies in operation room.

Key Words: Surgical Robot, Motion Tracking, Image Processing, Endoscopy, Ultrasound Imaging

1. はじめに

手術ナビゲーションやロボットなどナビゲーション医療分野の研究開発とその臨床応用・実用化における最大の課題は、軟性臓器の術中変形・動態への対応である。脳神経外科、整形外科、耳鼻科、口腔外科など、剛体である骨もしくは骨に囲まれた安定した臓器をを対象とするならば可能である精密な作業誘導や制御が、肝臓や消化管、骨盤内臓器など柔軟で呼吸・拍動および手術操作により容易に位置形状が変化してしまうものに対しては応用が極めて難しい。ナビゲーション医療技術を広く外科医療に応用するためには術中の臓器挙動への対応が求められる。すなわち、これまで医師の知識と経験と勘により対応していた動く対象への精密作業の実現に置いて、この動きの補償をサポートし、手技の信頼性の向上と医師の負担軽減を実現する術者アシスト技術が求められている。

術中の臓器挙動への対応の研究は、主として画像情報によるものと組織臓器の数値モデルによるシミュレーションによるものを中心に広く行われてきた。しかし胸腹部の手術においてこれらの技術の具体的な応用実現性を考えると、現時点では現在の技術レベルと臨床の要求レベルとのマッチングは難しくコスト面でも現実性が低く、現実的な先端医療の実現には障壁が大きい。臨床ニーズと技術シーズの双方向および手術室への導入上の課題から検証し、現実的に実現可能な術中臓器動態対応型ナビゲーション医療機器を開発することが重要である。

我々の取り組む術者アシスト技術研究の目的は、前述の観点から現在の手術室内での現実的な工学的応用可能技術と、その応用により大きな効用が期待できる新しい治療法の双方向からの検討により、術野内の臓器動態計測・追従による新しいナビゲーション治療技術を創成することである。具体的には、術中に取得可能な術野動態情報を基にした治療誘導技術が临床上必要な精度を達成しているか（ニーズに基づくシーズの評価）、そしてこの技術による誘導により成果の得られる治療法の開発が可能であるか（シーズに基づくニーズの選定）の2つの観点から、内視鏡下手術

における二つのナビゲーション技術(マクロ・ミクロナビゲーション技術)開発と治療法提案を実施した。本報告ではこれらの研究成果と将来展望について紹介する。

2. 術中動態対応型手術を実現する新しい手術法と計測・制御技術

2.1 等張液灌流式腹腔鏡下手術 "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⁽¹⁾。これは①術中に体腔内臓器を空気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革新的手術法である(Fig. 1)。

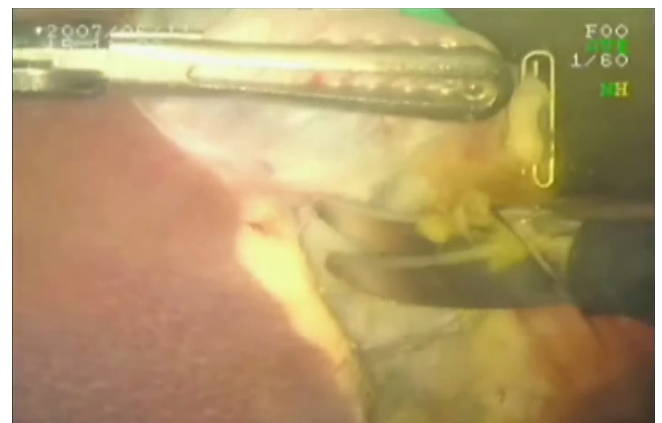


Fig. 1 Laparoscopic Cholecystectomy in WaFLES environment (Porcine model)

2.2 3D 超音波診断画像による WaFLES ナビゲーション

術前画像を用いた手術ナビゲーションにおける最大の課題は前述の通り軟性臓器の術中変形・動態への対応であり、臓器の移動変形が頻発し速度も速い腹部や泌尿器領域の低侵襲外科治療への応用は困難であった。脳外科においては術中変形対策として術中 MRI によるリアルタイム画像アップデートが活用されているが、この領域では MRI の撮影速度では十分な誘導精度を保証する誘導画像の提示が困難である。

WaFLES では従来内視鏡外科手術において術野空間の確保に用いられている炭酸ガス充填を排除し術野を液体で満たしているため、体外から腹壁を介して術野の超音波画像を取得することが可能である。特に大型の 3D プロンプを用いた超音波撮像が可能のため、広範な術野のリアルタイム 3 次元誘導画像をナビゲーションに利用できる。我々はリアルタイム術野情報が取得可能な術中超音波診断(US)画像と高品位な解剖情報が得られる術前 CT 画像双方を統合利用したナビゲーションの基礎開発研究として、術中 US-CT 画像レジストレーション法の開発を行った⁽²⁾。

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(Fig. 2)。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。

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、平均誤差約 3.4mm、平均計算時間約 10.3 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な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。

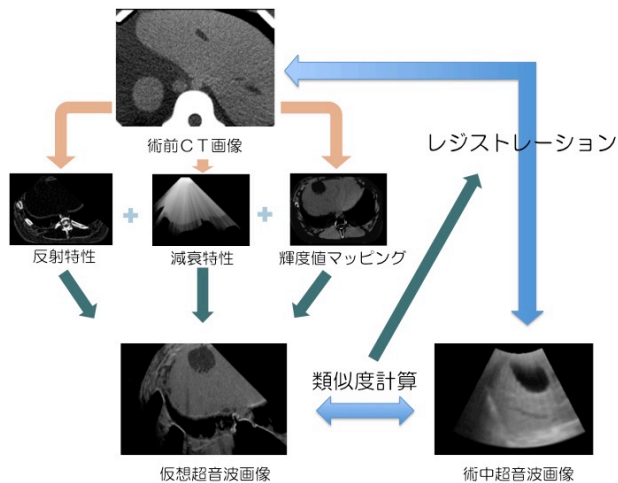


Fig. 2 Registration method between preoperative CT intraoperative 3DUS using virtual US data creation from preoperative CT data

2.3 内視鏡映像による臓器動態計測とロボット制御

医用画像ナビゲーションの時空間的な分解能・精度には、利用する画像診断装置の性能上限界がある。特に時間的分解能の高い、高速な臓器変形・揺動のセンシングは画像診断装置では困難であり、ここでの治療実現には他の手法による局所精密計測・ナビゲーション技術が必要となる。一方で新たにセンシングデバイスを術野に導入することは容易ではない。そこで我々は内視鏡下手術等の鏡視下手術の術野映像をセンサ情報として利用し、医用画像ナビゲーションでは不可能な時空間的分解能の高いナビゲーション技術を開発した。

本研究では内視鏡映像(30fps)による臓器動態計測によるナビゲーションの有効性を検証するため、拍動する心臓上にシート状の治療物質を移載する治療マニピュレータの開発と性能検証を行った。移植対象である心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 次元フーリエモデルを作成し、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心臓運動追従によるマニピュレータ搭載術具の誘導を実現した⁽³⁾。

ブタ心臓を用いた in vivo 実験では、心表面運動計測は誤差約 0.9mm という高い性能を実現し、これを用いて心臓の運動に治療マニピュレータを追従させた結果、誘導誤差約 1.4mm を達成した。内視鏡という手術室で利用可能なセンシングデバイスを用いた誘導は、運動のモデル化と予測を導入することによって高い精度を発揮することが確認された(Fig. 3)。

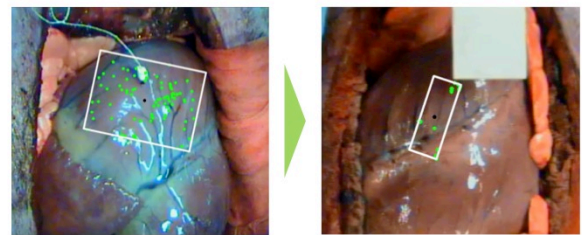


Fig. 3 Heart motion estimation using pyramidal LK tracker with masking module for manipulator and haration area

現在、この手法の WaFLES への応用を進めている。WaFLES 環境では臓器には拍動・呼吸動の他、水中内での浮力と灌流液の流圧による揺動も発生するため、この動きを内視鏡で計測し補償することで治療用エネルギーデバイス等の安定した位置決めを実現する術者アシストロボットの開発を行っている⁽⁴⁾。これらを通じ、現実的な臨床環境において移動変形する腹腔内臓器への精密な治療機器誘導が実現可能かについて検証を進めていく。

3. まとめ

本報告では我々の取り組む二つの術中動態対応型手術支援技術について報告した。これらの研究の特徴は手術室内に既に医療機器として導入されている装置をセンシングデ

バイスとして活用している点にある。ロボットビジョン等の技術分野で用いられるセンシングデバイスと比較して、あくまで診断装置であるこれらの計測データは時空間分解能・精度の面では劣るが、また既に医療機器としての承認が得られている装置であるため生体親和性や法規制・承認審査の面においてその利用における障壁が極めて低いことが期待される、現在及び将来において臨床上必要とされるであろう術中動態への対応において、現実的な解決法をもたらす一つのアプローチである。

一方、これらの診断技術センシングに基づく運動保証技術は先端のロボットビジョンにおける動体認識・運動補償等に比較するとその性能は必ずしも高くない。しかし、臨床上必要とされる位置計測精度、時間分解能、許容できる遅れは、それぞれの手術、術式、工程において様々であり、またあくまで医師の能力を拡大する人間アシスト技術としてとらえるならば、必ずしも全てにおいて人間と同等若しくは超越する能力を発揮する必要は無い。カーナビゲーションやアイサイトTM(富士重工業社)の空間分解能自体は単体では人間の認知能力に比して必ずしも高くないが、優れたドライバーアシスト技術による安全性と操縦性の向上を実現している。手術という複雑でリアルタイムに状況の変化する作業において必要なアシスト能力の把握と現実的に利用可能なセンシング・分析処理技術を駆使することにより、優れた新手術を実現するサポート技術を提供する一つのアプローチが果たされることを確信している。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金 若手研究 A(23680056)・基盤研究 B(15H03029)・挑戦的萌芽研究(16K12920)、コニカミノルタ科学技術振興財団画像科学奨励賞の支援により行われた。研究の推進にあたり東京女子医科大学清水達也教授、原口裕次講師、東北大学多田隈建次郎准教授、香港大学石井琢郎講師をはじめ多くの方の実験協力・試験材料/装置提供等の支援をいただいた。

参考文献

- (1) Tatsuo Igarashi, Yoshihiro Shimomura, Tadashi Yamaguchi, Hiroshi Kawahira, Harufumi Makino, Wen-Wei Yu, and Yukio Naya. Water-Filled Laparoendoscopic Surgery (WAFLES): Feasibility Study in Porcine Model *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. January/February, Vol. 22, No. 1, pp.70-75, 2012
- (2) 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, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 10, Supplement, pp.S56-7, 2015
- (3) 山本優希, 中村亮一, 映像情報に基づくヘラ型移植機構搭載心表面同期型心筋シート移植ロボットシステムの開発, *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol. 17, No. 3, pp.224, 2015
- (4) H. Nakata, R. Nakamura, Organ Motion Tracking System for Laser Surgical Robot System in Water-Filled Laparo-Endoscopic Surgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 11, Supplement, pp.S238-9, 2016