

VI. 実証研究のまとめ

令和２年度 国立研究開発法人日本医療研究開発機構（AMED）「高度遠隔医療ネットワーク研究事業」における『手術支援ロボットを用いた遠隔手術のガイドライン策定に向けた実証研究』、及び令和４年度国立研究開発法人日本医療研究開発機構（AMED）「高度遠隔医療ネットワーク研究事業」における『手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実現に向けた実証研究』の中で実施された実証研究の概要を以下に示す。

開催期	実証 研究 番号	研究名	種別	対象機器	備考
A M E D 第 I 期	1	次世代ロボットに係る通信技術に関する研究開発	遠隔手術支援	Saroad TM	
	2	商用回線と国産ロボットを用いた遠隔手術システムの開発	遠隔手術支援	Saroad TM	
	3	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	hinotori TM	
	4	商用回線と手術支援ロボットを用いた遠隔手術と屋内手術の比較	遠隔手術支援	hinotori TM	
	5	遠隔ロボット手術と現地ロボット手術のperformance比較	遠隔手術支援	Saroad TM	
	6	遠隔手術のセキュリティを強固にするための通信の冗長性の検討	遠隔手術支援	Saroad TM	
	7	遠隔手術における操作に係る遅延と映像圧縮・解凍処理に伴う映像劣化の許容水準に関する実証研究	遠隔手術支援	hinotori TM	
	8	国産ロボットにおけるダブルコンソール機能や力覚感知機能およびセキュリティ機能強化に関する実証研究	遠隔手術支援	Saroad TM	
A M E D 第 II 期	9	Dual cockpitを用いた遠隔ロボット手術システムにおける通信遅延の影響	遠隔手術支援	hinotori TM	
	10	学術情報ネットワークを介した遠隔手術の社会実装に向けた、3Dアノテーションの有効性に関する実証研究	遠隔手術指導	Saroad TM	
	11	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	hinotori TM	cadaver
	12	複数の通信回線を用いたロボット遠隔手術の通信冗長性の確保と遠隔手術指導システムの確立	遠隔手術支援	Saroad TM	
	13	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	hinotori TM	cadaver
	14	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	Saroad TM	緊急時対応シミュレーション
	15	8K映像伝送に次世代型遠隔手術の概念実証	遠隔手術指導	8K腹腔鏡	ヒト臨床試験
	参考資料	8Kスーパーハイビジョン技術を用いた新しい遠隔手術支援型内視鏡（硬性鏡）手術システムの開発	遠隔手術指導	8K腹腔鏡	
	16	手術支援ロボットを用いた遠隔手術時の緊急時対応プロセスの検証	遠隔手術支援	hinotori TM	緊急時対応シミュレーション
	17	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	Saroad TM	cadaver
	18	手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究	遠隔手術支援	Saroad TM	
	19	遠隔手術の社会実装に向けた、追従アノテーションの安全性に関する実証研究	遠隔手術指導	追従型 アノテーション	
	20	通信ネットワークを利用した2施設間での遠隔ロボット手術システムへのセキュリティ対策製品の適用と監視等に係る実証	遠隔手術支援	hinotori TM	

実証研究 1 次世代ロボットに係る通信技術に関する研究開発

●研究目的

- ネットワークを介したロボット操作の実現性を検討する。
- 通信遅延による手術への影響を数値化する。

●研究により明らかになったこと

- 通信遅延の増加とともにタスク完了時間やエラー回数、鉗子移動距離が増す。
- エキスパートであれば概ね 100msec の遅延は許容可能である。

●研究環境

- 研究期間：2020 年 7 月 31 日～2021 年 3 月 31 日
- 研究施設：リバーフィールド本社
- 使用回線：Network simulator (NetDisturb; ZTI Communications, Lannion)
- 遠隔手術器材：リバーフィールド社製ロボット
- 操作対象：非生体
- 操作者：手術未経験(学生) 20 名、腹腔鏡手術経験者 10 名、ロボット手術経験者 5 名
- 操作内容：A:順番通りの鉗子移動（片手動作）、B:糸のたぐり寄せ（両手動作）、C:棒の移動（片手動作）、D:リングの移動（両手動作）

●研究の背景と目的

遠隔手術には通信遅延が伴う。2001 年に行われた世界で最初の遠隔手術では、当時最高の専用回線を使用し、フランスのストラスブルグと米国ニューヨーク間で通信の遅延が 150msec であったとされている¹⁾。近年の通信技術の発展で VPN 回線であってもそれと同等もしくは、それより少ない遅延での遠隔手術が可能となってきた。しかし、どの程度の遅延であれば外科医が手術可能なのか、また遠隔から指導やアシストすることが可能であるのかは明らかではない。本検討ではネットワークシュミレーターを使い、手術ロボットの信号に擬似的な遅延を生じさせ、手術操作にどのような影響が生じるのかを検討した。

●検討方法と結果の概要

・方法

- 1) 本検討では被験者を 3 群にわけて、通信遅延に対する影響を調べた。
- 2) ネットワークシュミレーターで通信の遅延を以下に設定した。
画像転送を含む信号伝達往復の総遅延(delay): 0, 70, 100, 150, 200, 300 (msec)
- 3) 振動する台座の上で、以下の 4 つの決められたタスクを行い、完了までの時間、鉗子移動距離、エラー回数などを検討した。
 - ① 順番通りの鉗子移動（片手動作）
 - ② 糸のたぐり寄せ（両手動作）
 - ③ 棒の移動（片手動作）
 - ④ リングの移動（両手動作）

・結果の概要

- 1) すべてのタスクにおいて、遅延時間が長くなるほど完遂時間が長くなり、また鉗子移動距離も大きくなる傾向があった(図1)。
- 2) エキスパートでは、鉗子移動距離に対する通信遅延の影響は少なかった(図2)。

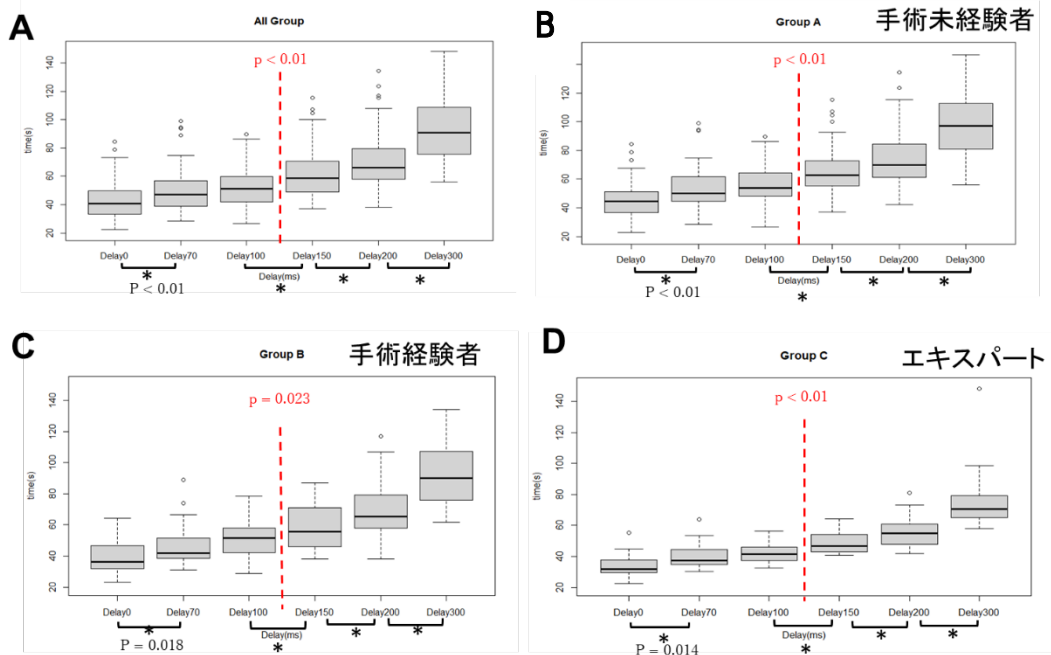
●結論および考察

全てのタスクで通信遅延の増加とともにタスク完了時間の延長がみられ、この傾向は通信遅延 100ms 以上で顕著となった。鉗子総移動距離、エラー回数に関しても概ね同様の結果であった。しかしながら、いずれの項目も手術経験が多い被験者(エキスパートグループ)では遅延の影響を受けにくかった。手術未経験者グループでの通信遅延 0 msec とエキスパートグループでの通信遅延 100msec のタスク完了時間、鉗子総移動距離はほぼ差を認めなかった。つまり、エキスパートが通信遅延 100ms 程度を生じる状況で行う遠隔手術と、経験の少ない術者が遅延 0 msec、すなわち現地で通常通り行う手術が同等の質となる可能性が示唆された。したがって、遠隔手術における通信遅延は 100msec 以下なら許容できる可能性が高いと考えられる。

●図表

【図1：作業完遂時間に対する通信遅延の影響】

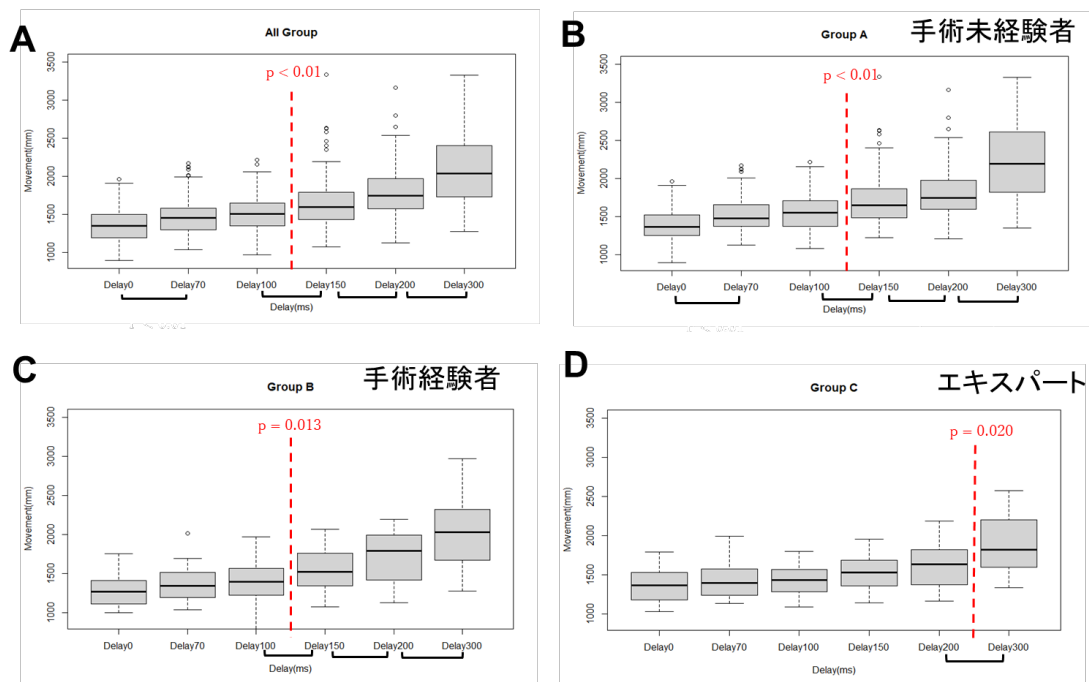
A では全被験者で、B-D では各被験者の特性別に、設定した通信遅延時間ごとの作業完了時間を箱ひげ図で示している。すべてのグループで所要時間は通信遅延が大きいほど延長している。



【図2：鉗子移動距離に対する通信遅延の影響】

各被験者グループ別に、通信遅延毎の鉗子移動距離を箱ひげ図で示している。B の手

術未経験者に比べ、D のエキスパートでは鉗子移動距離に対する通信遅延の影響が少ない。



●参考文献

- 1) Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al.: Transatlantic robot-assisted telesurgery. Nature, 413: 379-380, 2001.

●研究内容掲載論文

- Nankaku A, Tokunaga M, Yonezawa H, et al.: Maximum acceptable communication delay for the realization of telesurgery. PLoS One 17: e0274328, 2022.

実証研究 2 商用回線と国産ロボットを用いた遠隔手術システムの開発

●研究目的

- 遠隔手術ネットワークに求められる通信要件と課題を検討する。
- ギャランティー型回線とベストエフォート型回線の特性を検証する。
- 遠隔手術ロボットの映像と手術操作信号伝送に必要な帯域を検証する。
- 遠隔手術環境での手術ロボットの操作性と画質を評価、検証する。
- 通信回線が必要帯域を下回った時の手術成績と術者疲労度への影響を検証する。

●研究により明らかになったこと

- 2 種類の通信回線の平均往復遅延時間はギャランティー型回線で 4msec、ベストエフォート型回線で 10msec であった。
- リバーフィールド社製ロボットは、映像・操作信号の圧縮・解凍処理を加えることで、10Mbps の通信帯域で遅延の程度、操作性、画質ともに問題なく模擬遠隔手術を実施できた。
- 必要帯域未満の遠隔手術環境では、遅延時間や手術時間が同等であっても映像劣化により手術成績が低下し、外科医の疲労度が上がる。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 2 月 22 日～2 月 28 日
- 研究施設：弘前大学医学部附属病院一むつ総合病院
- 使用回線：NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 1Gbps、10Mbps、5Mbps）およびベストエフォート型回線（最大速度 1Gbps）
- 遠隔手術器材：リバーフィールド社製ロボット、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- 操作対象：非生体
- 操作者：ロボット手術有経験の外科医 6 名、未経験の外科医 6 名
- 操作内容：順番通りの鉗子移動（片手操作）、糸の手繰り寄せ（両手操作）

●研究の背景と目的

遠隔手術はロボット技術とネットワーク通信技術の組み合わせにより様々な分野で取り組まれてきている^{1,2)}。遠隔手術を社会実装するためには検証すべき技術的課題、整備すべき社会的、倫理的、経済的課題が多いため、遠隔手術の本格的な実用化には至っていない。遠隔手術を社会実装するために何よりも重要なことは通信の完全性と安定性である。特に通信遅延の発生はロボット操作の不安定性に繋がり、安全な手術をする上で大きな障害となる。したがって、手術支援ロボットの映像信号の情報量に応じた必要帯域を決定する必要がある。

本研究の目的は遠隔手術の実現を目的に現在、日本で開発中の手術支援ロボットを用い、通信環境と通信帯域のロボット作動に及ぼす影響を検討することである。

●検討方法と結果の概要

1) 必要帯域通と通信遅延

NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 1Gbps、10Mbps、5Mbps）とベストエフォート型回線（最大速度 1Gbps）とソリトン社のエンコーダ・デコーダ、リバーフィールド社のロボットを用いて約 150km 離れた弘前大学医学部附属病院とむつ総合病院の間で遠隔手術ネットワークを構築した（図 1）。遠隔手術ロボットタスクを行ったところ、通信遅延はギャランティー型回線で 4msec、ベストエフォート型回線では 10msec であった（図 2）。

2) Glass to Glass time

術野のカメラからエンコーダ、通信回線、デコーダ、モニターでの遅延時間を合計した伝送遅延を表す Glass to Glass time の中央値はギャランティー型回線では 92msec、ベストエフォート型回線では 95msec であった。

3) ロボットの操作性

外科医 12 名により順番通りの鉗子移動（片手操作）、糸の手繰り寄せ（両手操作）遠隔ロボットタスクを行ったところ、タスク時間は回線の種類や帯域速度による差は認められなかった（図 3 a）。むしろ、回数依存的な慣れの現象が認められた。また、タスクのエラー回数も回線の種類や帯域速度により有意差は認められなかった（図 3 b）。

4) 外科医の疲労度

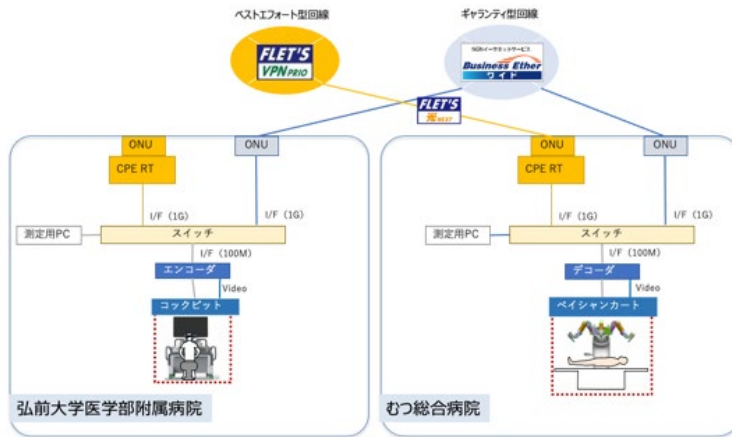
必要帯域未満である 1～3Gbps の通信環境のもとで、縫合結紮タスクを行なったところ、遅延時間や操作性に変化は認められなかったが、外科医はパケットロスが生じたことによる画像の歪み、粗さ、複視などの画像の劣化を感じ、それにより、疲労度の増加が認められた。

●結論および考察

今回検証した遠隔ロボット操作システムでの通信環境下では十分な帯域を用意することで通信遅延や画像の劣化は遠隔手術への影響が無く、今後の臨床応用に十分期待されると考えられた。

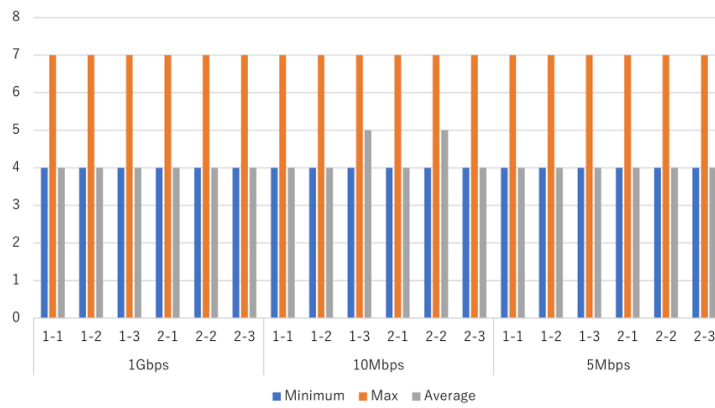
●図表

【図 1：システム構成】

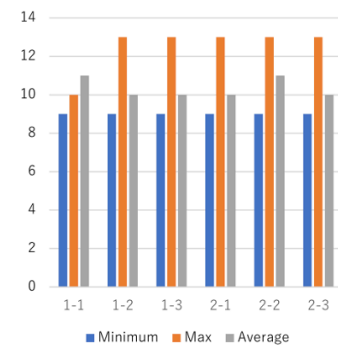


【図 2：タスク中の通信遅延の例】

(a) ギャランティー型回線

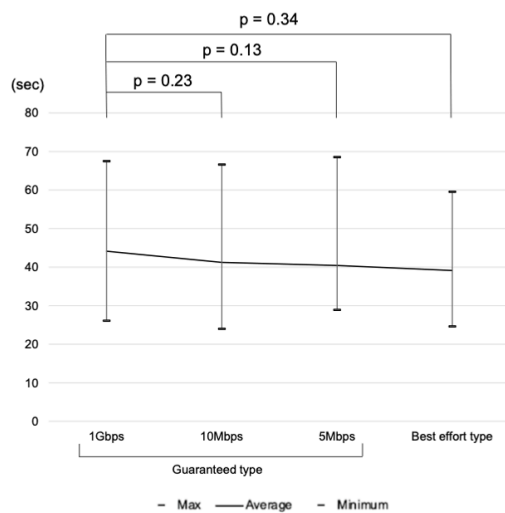


(b) ベストエフォート型回線

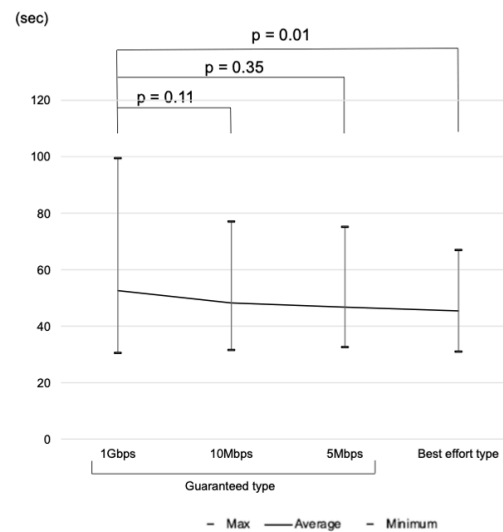


【図 3a：ロボットタスク時間】

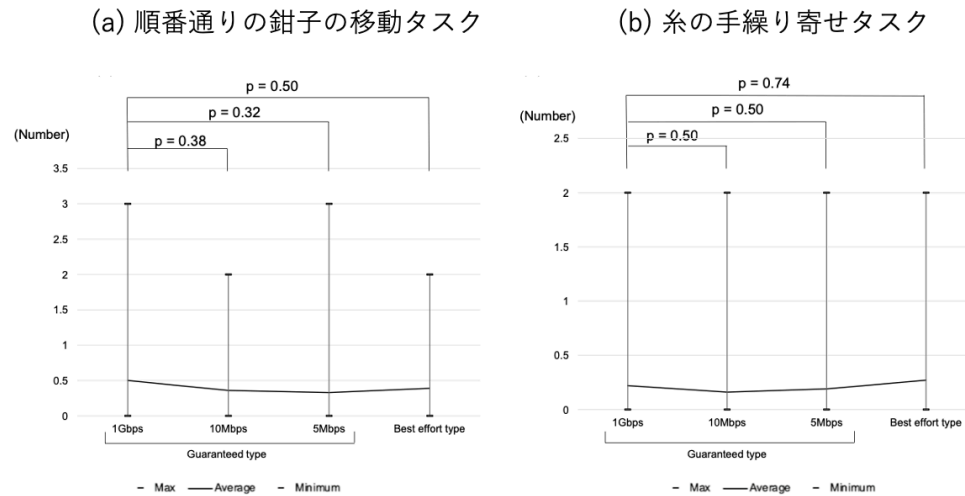
(a) 順番通りの鉗子の移動タスク



(b) 糸の手繰り寄せタスク



【図 3b：ロボットタスクエラー回数】



●参考文献

- 1) Hung A J, Chen J, Shah A, et al.: Telementoring and Telesurgery for Minimally Invasive Procedures. J Urol, 199: 355-369, 2018.
- 2) Zheng J, Wang Y, Zhang J, et al.: 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China. Surg Endosc, 34: 5172-5180, 2020.

●研究内容掲載論文

- ・ Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al.: Social implementation of a remote surgery system in Japan: a field experiment using a newly developed surgical robot via a commercial network. Surg Today, 52: 705-714, 2022.
- ・ Akasaka H, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Impact of the suboptimal communication network environment on telerobotic surgery performance and surgeon fatigue. PLoS One, 17: e0270039, 2022.

実証研究 3 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- 手術支援ロボット hinotori™ の遠隔手術における必要通信帯域を検証する。

●研究により明らかになったこと

- hinotori™ における必要通信帯域は 150 Mbps 以上である。
- 回線の通信帯域が 150 Mbps 以下の場合には、画像圧縮量を変更することにより遠隔作業を行うことができる。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 7 月 28 日～2021 年 8 月 9 日
- 研究施設：北海道大学病院—九州大学病院（手術室間接続）
- 使用回線：Science Information NETwork (SINET)
- 遠隔手術器材：メディカロイド社製ロボット hinotori™（エンコーダ・デコーダ内包）
- 操作対象：非生体
- 操作者：腹腔鏡手術経験者 10 名
- 検証内容：SINET による通信環境下に通信帯域を 500 Mbps から 100 Mbps に漸減し、各帯域における通信遅延ならびにパケットロスについて検証
- 操作内容：人工皮膚モデルを用いた縫合結紮

●研究の背景と目的

遠隔手術は、移動による患者と外科医の身体的、精神的、および経済的な負担を軽減できる。遠隔手術の社会導入には、安定した通信環境の構築が必要である。特に、通信遅延や重大なパケットロスによる映像の劣化あるいはロボット機能の低下は、安全な遠隔手術の大きな障害となる^{1,2)}。これらを回避するためには、各遠隔手術ロボット稼働のためのデータの量に応じた必要通信帯域を決定することが不可欠である。本研究の目的は、手術支援ロボット hinotori™ の遠隔手術環境で使用した際の必要帯域を検証することである。

●検討方法と結果の概要

- 1) 通信帯域を 500 Mbps から 100 Mbps に漸減し、各通信帯域における通信遅延ならびにパケットロスとジッタにつき検証した。全ての通信帯域において、遅延は 30 msec であり、ジッタは 0-0.35 msec であった。通信帯域 145 Mbps において、5-7 % のパケットロスならびに画像の劣化が認められた（図 1、2）。
- 2) 通信帯域 145 Mbps に固定し、各画像圧縮（VC）量（VC1：120 Mbps、VC2：40 Mbps、VC3：20 Mbps）にて通信遅延ならびにパケットロスにつき検証した。更に、各画像圧縮量において、縫合結紮作業の評価を行った。評価項目は、①作業完遂時間、②Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS)、③System and Piper Fatigue

Scale-12 (PFS-12)。VC 1 においてパケットロス は 3-7%認められたが、VC 2 および VC 3 では、パケットロス は認められなかった。通信遅延 (RTT) とジッタは、各画像圧縮量 において差は認められなかった (図 3)。また、VC1 において VC2 および VC3 よりも 縫合結紮の作業評価が有意に劣っていた (図 4)。

●結論および考察

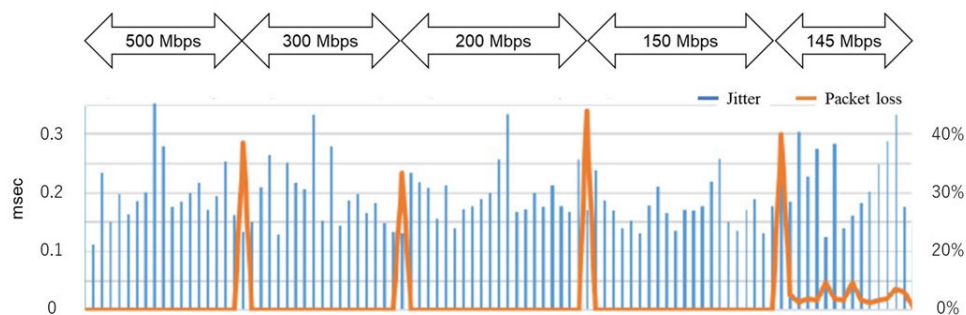
遠隔手術用ロボット hinotori™ における通信遅延は 30 msec であり、通信帯域 145 Mbps において画像の劣化が認められた。通信帯域 145 Mbps においては、画像の劣化に起因したと考えられる作業完遂時間の延長、作業スキルの低下、外科医の疲労度の増強が認められた。

一方で、画像圧縮量を変更することにより画像劣化の改善が認められ、通信帯域 145 Mbps においても遠隔操作が可能であった。今回の検討において、遠隔手術用ロボット hinotori™ の必要通信帯域は 150Mbps であることが証明された。また、通信帯域が必要通信帯域以下である場合には、画像圧縮量を変更することにより、遠隔作業が可能であると考えられた。

●図表

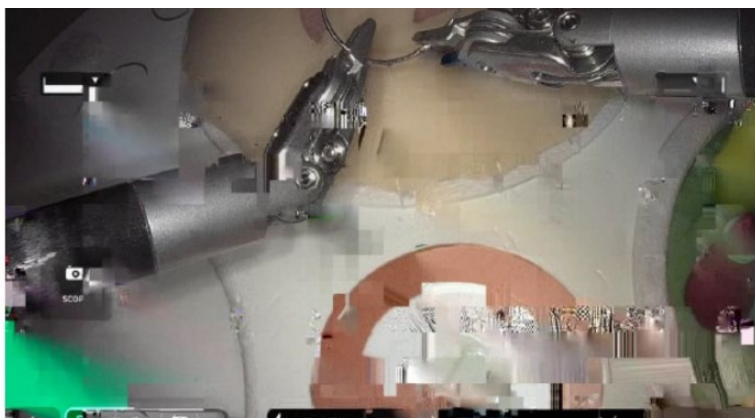
【図 1：通信帯域 500 Mbps, 300 Mbps, 200 Mbps, 150 Mbps, 145 Mbps によるパケットロスとジッタ】

通信帯域 145 Mbps において 3-7 % のパケットロスが認められた。全ての帯域において、ジッタは 0-0.35 msec であった。



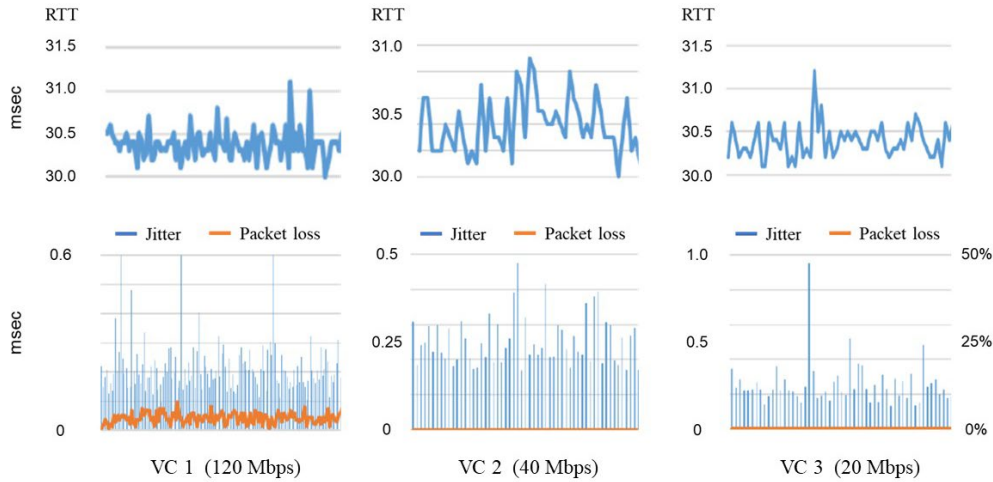
【図 2：通信帯域 145 Mbps における画像の劣化】

通信帯域 145 Mbps において、画像の劣化が認められた。



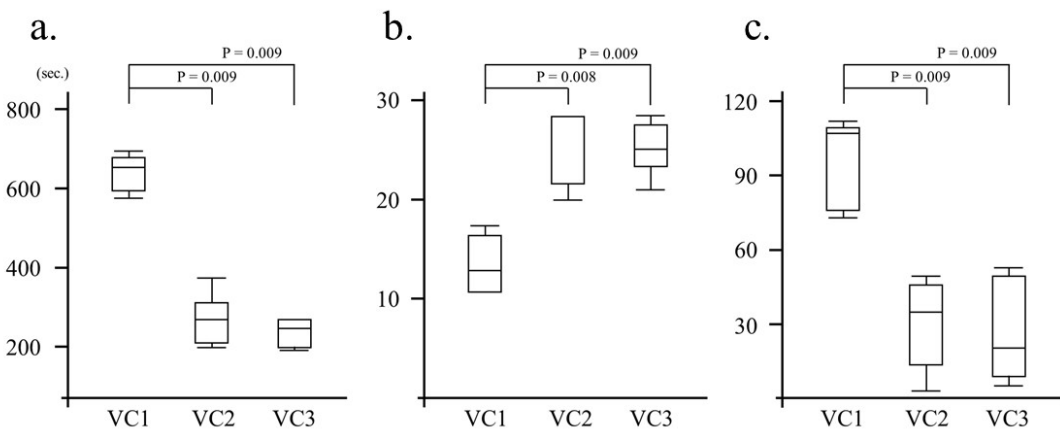
【図3：映像圧縮(VC)量による通信遅延(RTT)、パケットロス、ジッタの比較】

VC 1 (120 Mbps) では、パケットロスは 3-7%であった。VC 2 (40 Mbps) および VC 3 (20 Mbps) では、パケットロスは観察されなかった。通信遅延 (RTT) とジッタは全ての VC で変化は認められなかった (RTT: 30-31.5 msec、ジッタ: 0-1.0 msec)。



【図4：各映像圧縮 (VC) 量における作業完遂時間、作業評価の比較】

通信帯域 145 Mbps における作業評価項目では、VC1 で VC2 および VC3 よりも劣っていた。a: 縫合結紮完遂時間、b: Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS)、c: System and Piper Fatigue Scale-12 (PFS-12)



●参考文献

- 1) Sterbis JR, Hanly EJ, Herman BC, et al.: Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model. *Urology*, 71: 971-973, 2008.
- 2) Ngan C, Miller B, Patel R, et al.: Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype. *Int J Med Robot*, 4: 304-309, 2008.

●研究内容掲載論文

- ・ EbiharaY, Oki E, Hirano S, et al.: Tele-assessment of bandwidth limitation for remote robotics surgery. Surg Today, 52: 1653-1659. 2022.

実証研究 4 商用回線と手術支援ロボットを用いた遠隔手術と屋内手術の比較

●研究目的

- SINET 環境で計測された手術支援ロボット hinotori™ の必要帯域を商用回線で検証する。
- hinotori™ の必要帯域と通信帯域を可変し、手術ロボット、通信、情報処理技術の最適解を求める。
- 通常の屋内環境と遠隔手術環境において、人工臓器を用いた手術パフォーマンスの違いを検討する。

●研究により明らかになったこと

- SINET 環境で得られた hinotori™ の必要帯域は商用回線でも再現性が得られた。映像伝送の必要通信帯域は約 120Mbps、手術操作とロボット制御に要する通信帯域は約 30Mbps、合計で約 150Mbps であった。
- 200Mbps 帯域保証型回線を用いた遠隔手術環境では、屋内環境よりも 27msec の遅延時間が発生した。
- 人工臓器モデルに対する遠隔手術は通常の屋内環境と遜色なく実施することができた。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 8 月 21 日～8 月 27 日
- 研究施設：弘前大学医学部附属病院一むつ総合病院
- 使用回線：NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 200Mbps）
- 遠隔手術器材：メディカロイド社製ロボット hinotori™（エンコーダ・デコーダ内包）
- 操作対象：非生体
- 操作者：10 名の外科医
- 操作内容：人工臓器モデルを用いた模擬遠隔ロボット手術(胆嚢摘出術、腸管縫合術)

●研究の背景と目的

遠隔ロボット手術は通信遅延と映像伝送遅延が妨げとなり、一般的に遅延時間が 100msec 以上では操作性に影響し手術が困難であるとされている^{1,2)}。遅延は構築する通信環境や使用するロボットにより異なるため、遠隔手術を実現するためには様々な通信環境とロボットの組み合わせで検証する必要がある。本研究の目的は商用回線と国産手術支援ロボット hinotori™ を用いて遠隔環境下と通常の屋内環境下での通信環境とロボットの動作性を検証し、遠隔手術の実現可能性を検討することである。

●検討方法と結果の概要

1) 遠隔ロボット手術環境の構築

NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 200Mbps）とメディカロイド社の手術支援ロボット hinotori™を用いて約 150km 隔てた弘前大学医学部附属病院とむつ総合病院間で遠隔手術ネットワークを構築した（図 1）。

2) 必要帯域と通信遅延

10 名の外科医による遠隔環境下に物体を移動させる単純なロボットタスクを行ったところ（図 2）、通信遅延は先行研究で得られた SINET 環境での必要帯域が商用回線においても再現性をもって確認された。遠隔回線の通信遅延は中央値 4 [2-12]msec であり、遠隔環境においてエンコーダ・デコーダ処理により屋内環境に 27msec の遅延時間が加わった。

2) 遠隔手術環境と屋内手術環境の比較

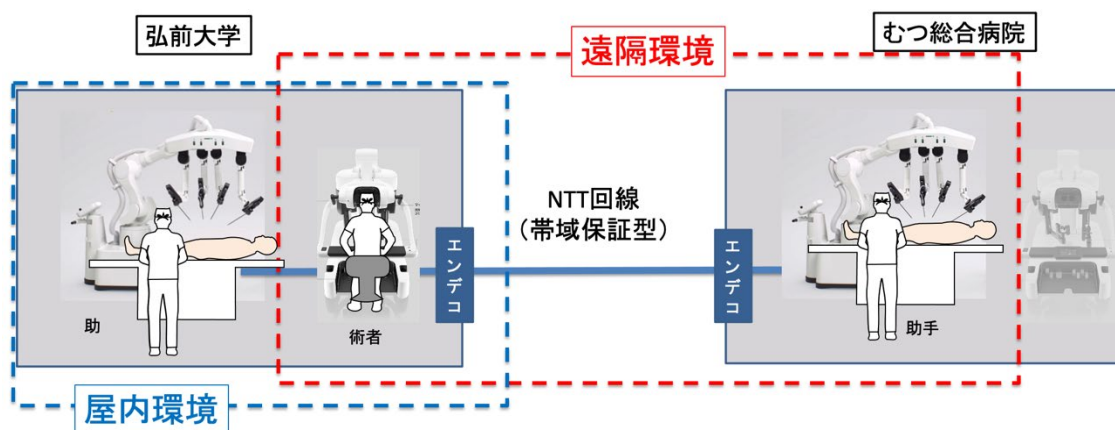
人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術（図 3）、腸管縫合術（図 4）はいずれも遠隔環境と通常の屋内環境との間で正確性、エラー回数、完遂時間に有意差は認められなかった。

●結論および考察

商用回線を用いた hinotori™による遠隔手術が屋内手術と同等のパフォーマンスを示したことから、今回のシステムが遠隔手術の社会実装に必要な要素技術を有していることを示した。

●図表

【図 1：システム構成】



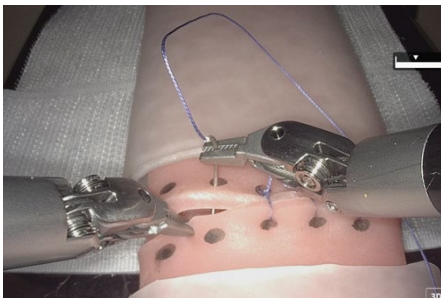
【図 2：物体の移動タスク】



【図 3：胆嚢摘出モデル】



【図 4：腸管縫合モデル】



●参考文献

- 1) Xu S, Perez M, Yang K, et al.: Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator. Surg Endosc, 28: 2569-2576, 2014.
- 2) Kim T, Zimmerman PM, Wade MJ, et al.: The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery. Surg Endosc, 19: 683-686, 2005.

●研究内容掲載論文

- ・ Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al: Reappraisal of telesurgery in the era of high-speed, high-bandwidth, secure communications: Evaluation of surgical performance in local and remote environments. Ann Gastroenterol Surg, 7: 167-174, 2023.

実証研究 5 遠隔ロボット手術と現地ロボット手術の performance 比較

●研究目的

- 同一術者による遠隔ロボット手術と現地ロボット手術の performance の差について人工臓器を用いた模擬手術により比較検討する。

●研究により明らかになったこと

- 遠隔ロボット手術と現地ロボット手術の performance 評価に差は認められなかった。
- 遠隔ロボット手術において左手鉗子の移動距離が延長した。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 9 月 18 日～2021 年 9 月 19 日
- 研究施設：北海道大学病院―市立釧路総合病院（手術室間）
- 使用回線：NTT 東日本ベストエフォート型回線（最大速度 1 Gbps）
- 遠隔手術器材：リバーフィールド 社製手術支援ロボット、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- 操作対象：非生体
- 操作者：ロボット手術経験者（日本内視鏡外科技術認定医） 8 名
- 評価者：日本内視鏡外科学会認定ロボット手術プロクター 2 名
- 検証内容：Randomized single-blind crossover trial として被験者には遠隔操作か現地操作かをブラインド化し、主観的ならびに客観的作業評価を行った。
- 操作内容：人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術

●研究の背景と目的

近年、光ファイバーを用いた高速・大容量通信技術の開発や新規手術ロボットの開発により、遠隔ロボット支援下手術の社会実装に期待が高まっている¹⁾。しかし、現在まで、手術支援ロボットを用いた遠隔手術における performance に関する報告は少ない。また、本邦において手術支援ロボットを用いた遠隔手術に関する前向き検証試験の報告もない。本研究の目的は、国産手術支援ロボットを用い、遠隔手術と現地手術の手術 performance の評価を行い、遠隔手術における問題点を明らかにすることである。

●検討方法と結果の概要

対象は、ロボット手術経験者（日本内視鏡外科学会技術認定医） 8 名。被験者には、遠隔操作か現地操作かをブラインドとし、人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術を行い（図 1）、作業評価を行った(randomized single-blind crossover trial)（図 2）。客観的評価は、日本内視鏡外科学会認定ロボット手術プロクター 2 名にて行った。評価項目は、①作業完遂時間、②鉗子移動距離、③Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS)、④Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS)、⑤System and Piper Fatigue Scale-12 (PFS-12)を

用いた。全例で胆嚢摘出術が完遂された。遠隔手術ならびに現地手術において作業完遂時間、GERAS、GOALS、PFS-12 に差は認められなかった（図3）。遠隔手術では現地手術に比べ、左手鉗子の有意な移動距離延長が認められた（図4）。

●結論および考察

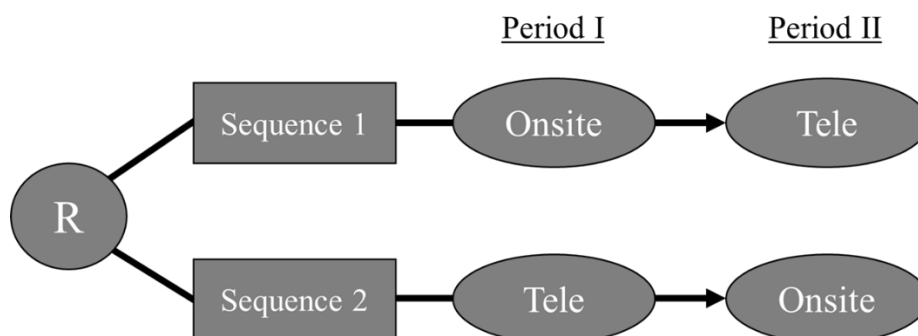
手術支援ロボットを用いた遠隔手術は安全に施行可能であった。また、遠隔手術においては現地手術に比べ、術者の疲労度に差は認められなかった。しかし、鉗子移動距離は遠隔手術において延長傾向にあり、特に左手鉗子移動距離は現地手術に比べ、有意に延長が認められた。今回の検討において、ロボット手術経験のある外科医ではストレスなく安全に遠隔ロボット手術が施行可能であることが証明された。しかし、Overshoot（過大操作）と考えられる鉗子移動距離延長が遠隔手術において認められており、何らかの対応が必要と考えられた。

●図表

【図1：人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術】

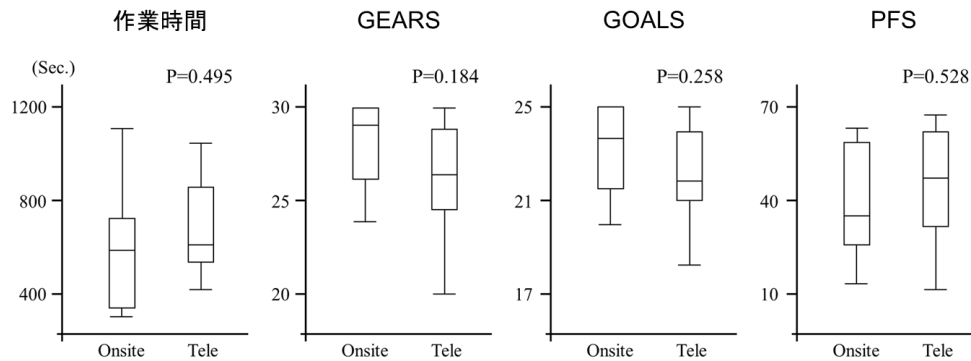


【図2：Randomized single-blind crossover trial】



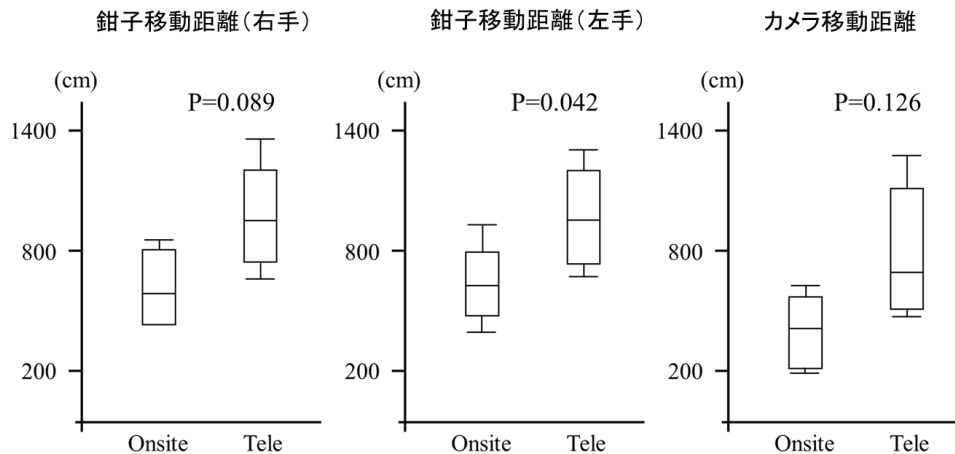
【図3：遠隔手術と現地手術の作業評価】

作業完遂時間、Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS)、Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS)、System and Piper Fatigue Scale-12 (PFS-12)において差は認められなかった。



【図4：遠隔手術と現地手術の鉗子移動距離】

遠隔手術において左手鉗子の移動距離が有意に延長した。



●参考文献

- 1) Zheng J, Wang Y, Zhang J, et al.: 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China. Surg Endosc, 34: 5172-5180, 2020.

●研究内容掲載論文

- ・ Ebihara Y, Hirano S, Takano H, et al.: Technical evaluation of robotic tele-cholecystectomy: a randomized single-blind controlled pilot study. J Robot Surg, 17: 1105-1111, 2023.

実証研究 6 遠隔手術のセキュリティを強固にするための通信の冗長性の検討

●研究目的

- 遠隔手術中の通信遮断・瞬断時に備えた通信システムを構築する。
- 通信回線を冗長構成とし、通信の遮断、復旧が遠隔手術に与える影響を検証する。

●研究により明らかになったこと

- 通信回線をギャランティー型回線とベストエフォート型回線の冗長構成とすることにより、一方の回線の遮断・復旧を行なっても、画質やロボットの操作性への影響がなかった。
- 冗長性を維持した通信システムを構築することにより、生体に対する手術に対しても通信遮断時の遠隔手術が継続可能であった。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 10 月 23 日～10 月 24 日、10 月 30～31 日
- 研究施設：弘前大学医学部附属病院―北里大学獣医学部附属病院
- 使用回線：NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 10Mbps）とベストエフォート型回線（最大速度 1Gbps）
- 遠隔手術器材：リバーフィールド社製手術支援ロボット、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- 操作対象：非生体と生体（ブタ）
- 操作者：経験豊富な 12 名の外科医（ロボット手術経験者を含む）
- 操作内容：①人工臓器モデルを用いた模擬遠隔ロボット手術（胆嚢摘出術、腸管縫合術）、②生体（ブタ）に対する遠隔ロボット手術（胃切除術、直腸切除術、胆嚢摘出術）

●研究の背景と目的

これまで、弘前市と約 150km 離れたむつ市を開発中のリバーフィールド社製ロボットシステムを用いて商用回線で接続し、様々な帯域で通信遅延や画質を検証した結果、手術に必要とされる通信環境を構築することに成功した¹⁾。ロボット遠隔手術では通信の完全性、安定性が重要であるが、遠隔手術中に通信機器や回線に予期せぬ障害が生じ、通信が遮断された際にも通信の冗長性が担保されることは極めて重要である。本研究の目的は 2 種類の通信回線を併用するロボット遠隔手術システムを構築し、生体を用いた遠隔手術中の通信遮断発生時やその復旧後も手術が継続可能なシステムを構築することが可能かどうかを検討することである。

●検討方法と結果の概要

1) 遠隔ロボット手術環境の構築

NTT 東日本ギャランティー型回線（帯域保証速度 10Mbps）とベストエフォート型回線（最大速度 1Gbps）とソリトン社のエンコーダ・デコーダ、リバーフィールド社のロボットを用い、約 100km 離れた弘前大学医学部附属病院と北里大学獣医学部附属病院間で遠隔手術ネットワークを構築した（図 1）。

2) 通信遮断と復旧による静止画と動画の画像への影響

通信環境の変化による画質の劣化のタイプと手技への影響を分析するために画質を①鮮明さ、②立体性、③完全性、④連続性、⑤手技への影響の 5 項目からなる評価項目を作成し検討した。その結果、ほとんどの被験者が通信遮断による静止画と動画への影響がなかったと回答した。

3) 人口臓器モデル

6 名の外科医により胆嚢摘出モデルと腸管縫合モデルを用いたタスクを通信回線の切り替えがある状況と無い状況で行った。その結果、回線遮断および復旧による影響は認めなかった。

4) ブタの手術に対する影響

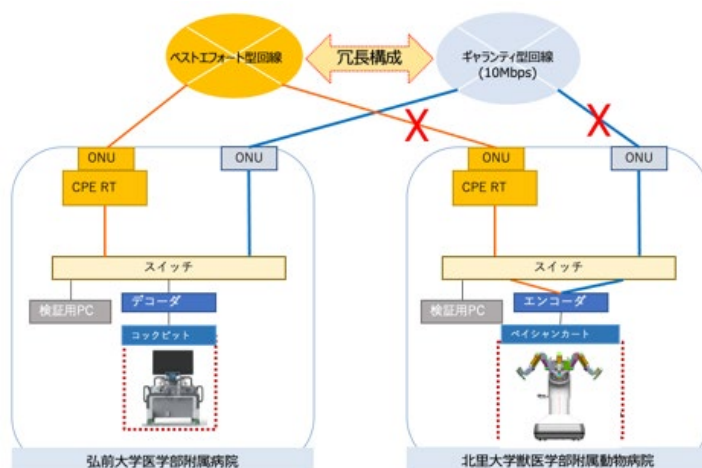
12 名の外科医によるブタを用いた胃切除、直腸切除、胆嚢摘出（図 2）を行い、手術中の継続の可否や画像への影響を検討した。また、通信遮断中の腎静脈からの出血に対する止血操作を評価した。全ての術式においてブタの手術中の回線遮断・復旧によるロボット操作の継続性に影響はなかった。腎静脈穿刺による出血から圧迫止血までに要した平均時間は 8.88 秒、針糸の把持から縫合止血を完了するまでの平均時間は 6 分であり、全例で縫合止血に成功した。

●結論および考察

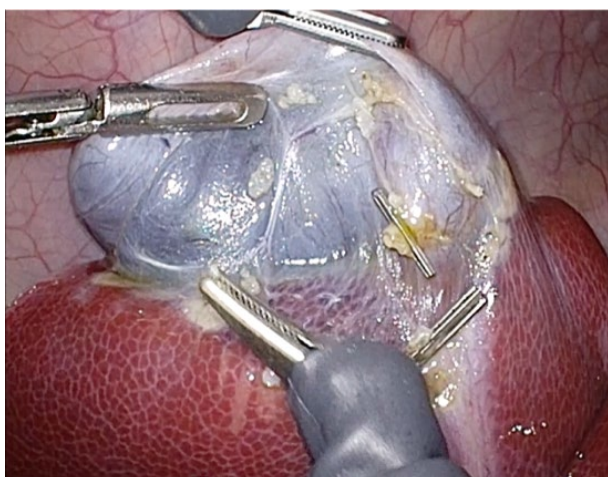
2 系統の通信回線を敷設することにより、遠隔手術時の通信遮断によっても手術中のモニター画像やロボット操作の継続性に影響が無い通信システムを構築することが可能であった。

●図表

【図 1：システム構成】



【図2：生体（ブタ）における胆嚢摘出術】



●参考文献

- 1) Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al.: Social implementation of a remote surgery system in Japan: a field experiment using a newly developed surgical robot via a commercial network. Surg Today, 52: 705-714, 2022.

●研究内容掲載論文

- ・ Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al.: Construction of redundant communications to enhance safety against communication interruptions during robotic remote surgery. Sci Rep, 13: 10831, 2023.

実証研究 7 遠隔手術における操作に係る遅延と映像圧縮・解凍処理に伴う映像劣化の許容水準に関する実証研究

●研究目的

- 遠隔手術で必要となる通信ネットワークの仕様値を知るために操作に係る遅延時間、映像圧縮解凍処理に伴う映像劣化が実際の手術中にどの程度許容できるかを検討する。

●研究により明らかになったこと

- 使用した手術機材の条件下における遅延時間の許容限界については、50msec 以上 100msec 未満と想定された。
- 映像圧縮について、使用した映像処理機器の条件下ではフルハイビジョン 3D 映像を 10Mbps にまで圧縮しても手術可能であることが示唆された。

●研究環境

- 研究期間：2021 年 12 月 22 日
- 研究施設：メディカロイド社（神戸市 ポートアイランド内）
- 使用回線：疑似遠隔環境回線
- 遠隔手術器材：メディカロイド社製ロボット hinotori™（エンコーダ・デコーダ内包）
- 操作対象：生体（ブタ）
- 操作者：ロボット手術経験の豊富な 8 名の消化器外科医師
- 操作内容：人工臓器モデルを用いた模擬遠隔ロボット手術とブタに対する遠隔ロボット手術

●研究の背景と目的

遠隔手術の最大のハードルは遅延の問題であり、術者が許容しうる遅延時間については、既に多くの研究成果が報告されている¹⁻³⁾。

遠隔手術の情報伝送において、最も情報量の多いのは映像伝送であり、フルハイビジョン 3D 映像の非圧縮伝送に必要な通信帯域は、一般的な商用回線の通信帯域を大きく上回る。そのため、情報処理技術により映像情報を圧縮して必要通信帯域を減少する必要があるが、圧縮率を増加させることで遅延時間は増大し、映像劣化が生じうる。一方で、広帯域の商用回線は高額であり、経済性も考慮して通信帯域を設定することが求められる。そのため、映像圧縮処理後の必要通信帯域の程度と、発生する遅延と映像劣化の手術パフォーマンスに対する影響度について検討する必要がある。

●検討方法と結果の概要

疑似遠隔環境システムを構築した（図 1）。ブタを用いた胃切除と直腸切除の手術中にエ

ミュレータの設定を変更しながら遅延時間を、エンコーダの設定を変更しながら映像圧縮の程度をそれぞれ変化させ、許容される水準について術者がアンケート形式で主観的評価を行なった（表 1、2）。遅延時間について、30msec と 50msec で平均値 3.6、4.0 と評価された、手術は実施可能であった。しかし、100msec と 150msec では平均 2.9、2.3 と評価され、手術が不可能であった。映像圧縮について、20Mbps、30Mbps、60Mbps、120Mbps いずれも平均 4.0 以上と手術可能と評価された。

●結論および考察

使用した手術機材の条件下における遅延時間の許容限界については 50msec 以上 100msec 未満と想定された。映像圧縮については今回使用したエンコーダの限界である 10Mbps まで圧縮しても手術が可能と評価された。代表的な被実験者の主観的評価の結果を示す（図 2）。

●図表

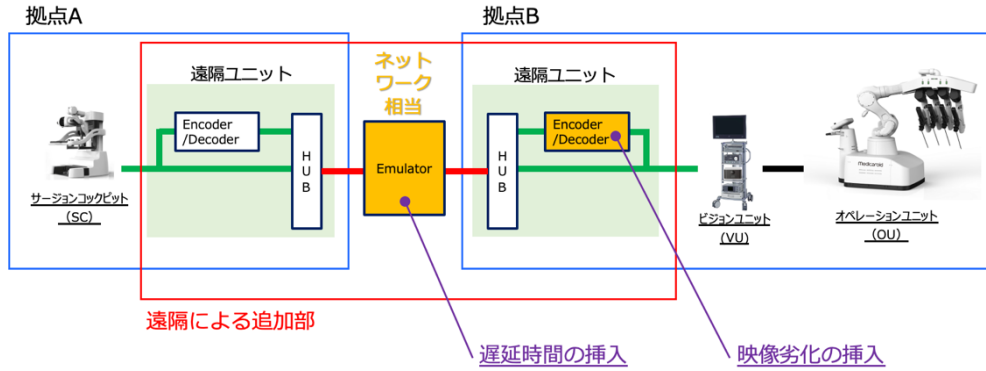
【表 1：遅延時間に対する主観評価項目】

遅延時間 (エミュレータ、エンデコで発生させる時間の合計)	1 全く不可能	2 一部出来るところもあるがほとんどの部分で不可能	3 全体を通して違和感はあるが可能	4 一部違和感を感じる部分もあるが可能	5 違和感を感じることは無く可能
30ms					
50ms					
100ms					
150ms					

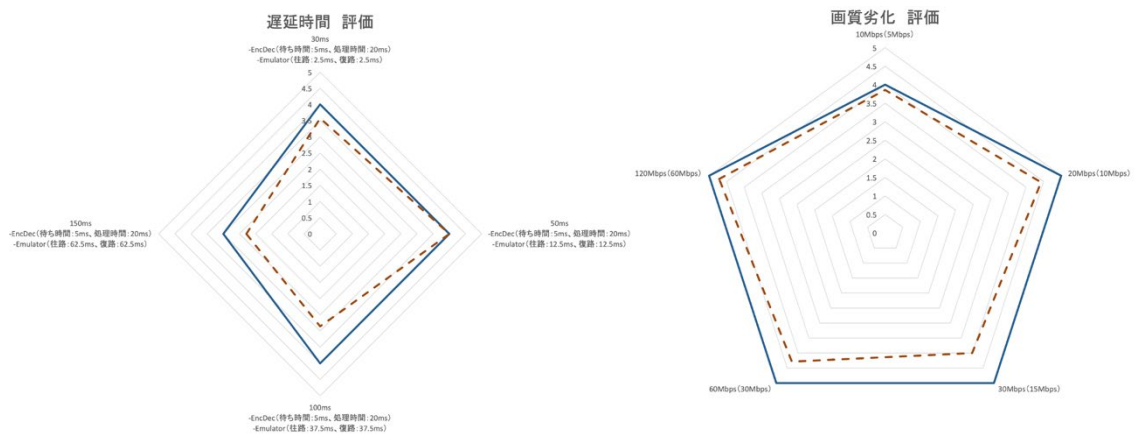
【表 2：映像劣化に対する主観評価項目】

画像圧縮度 ()内は左目右目それぞれの値	1 全く不可能	2 一部出来るところもあるがほとんどの部分で不可能	3 全体を通して違和感はあるが可能	4 一部違和感を感じる部分もあるが可能	5 違和感を感じることは無く可能
120Mbps (60Mbps)					
60Mbps (30Mbps)					
30Mbps (15Mbps)					
20Mbps (10Mbps)					
10Mbps (5Mbps)					

【図 1：システム構成】



【図 2：主観的評価の結果（被験者の 1 例）】



●参考文献

- 1) Nguan C, Miller B, Patel R, et al.: Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype. Int J Med Robot, 4: 304-309, 2008.
- 2) Xu S, Perez M, Yang K, et al.: Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator, Surg Endosc, 28: 2569-2576, 2014.
- 3) Kim T, Zimmerman PM, Wade MJ, et al.: The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery. Surg Endosc, 19: 683-686, 2005.

●研究内容掲載論文

- ・ Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Verification of delay time and image compression thresholds for telesurgery. Asian J Endosc Surg, 16: 255-261, 2023.

実証研究 8 国産ロボットにおけるダブルコンソール機能や力覚感知機能およびセキュリティ機能強化に関する実証研究

●研究目的

- 国産手術支援ロボットにおけるダブルコンソールによる遠隔アノテーション機能を検討する。
- ロボットの内蔵機能である力覚の遠隔伝送に関して検討する。
- 3重のセキュリティを付加したネットワークの通信状態を検証する。

●研究により明らかになったこと

- 新たに開発されたダブルコクピットにより現地術者と遠隔術者との操作権の切り替えが可能であり、有効なアノテーションが可能であった。
- 手術支援ロボットの内蔵機能により遠隔から力覚を感知可能であった。
- AES128に加え、IPsecを用いて暗号化して情報を送信した場合の通信遅延の増加量は2-3msecであった。

●研究環境

- 研究期間：2022年3月25日～2022年3月27日
- 研究施設：九州大学医学研究院附属動物実験施設－九州大学病院別府病院
- 使用回線：NTT西日本ギャランティー型回線（帯域確保速度40Mbps）、ベストエフォート型回線（最大速度1Gbps）
- 遠隔手術器材：リバーフィールド社製ロボット、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- 操作対象：実験動物(ブタ)
- 操作者：消化器外科医師、泌尿器科外科医師
- 操作内容
 - 腸間膜からの出血に対する遠隔からの止血手技
 - 胆のう摘出術に対する遠隔からアノテーション
 - 鉗子把持操作による腸管挫滅度の力覚の有無による評価

●研究の背景と目的

実際の遠隔手術では、現地施設と遠隔施設から1つのロボットを操作するダブルコクピットで、操作権を切り替えながら手術を行うことが必要である。今回の実証実験では遠隔手術の実用化に向け新たに開発されたダブルコクピットを用いて、有効なアノテーションが可能であることを初めて確認した。さらにロボットに付加された力覚機能の検証、およびAES128に加えIPsecを用いて暗号化して情報を送信した場合の通信遅延の増加量についても確認を行った。

●検討方法と結果の概要

1) 2つのコンソールによる遠隔手術

九州大学動物実験室（福岡）にリバーフィールド社製ロボット本体とコクピット①、

九大病院別府病院にコクピット②を設置し（図1）、九州大学動物実験室で泌尿器科医が胆のう摘出術を行い、別府病院より消化器外科医が適宜術者を交代しながら胆のう摘出を合計3回行った。

遠隔による術者権限の切り替えに必要な時間を算出するため、操作中に遠隔地から強制的にシステムを遠隔に切り替え、止血に要する時間を算出した。8人の外科医が3回ずつ止血操作を行い、止血に要する平均時間は10.64秒であった。

2) 鉗子把持操作による腸管挫滅度の力覚フィードバックの有無による評価（図2）

力覚を術者にブラインドで3段階に変化させ、福岡（現地）と別府（遠隔地）からそれぞれ5人の術者が10回連続で腸管を把持し、挙上する動作を行った。その際の把持力を測定した。平均把持力は、力覚レベル0（なし）では3.2N、レベル1（弱）では2.0N、レベル2（強）では1.7Nであった。術者が現地と遠隔地どちらでも力覚フィードバックがある場合、力覚フィードバックなし場合と比較して、有意に弱い力で腸管を把持していた

3) セキュリティを付加したネットワークの通信状態の検証

IP-VPN回線上にてエンコーダ/デコーダ間でのAES128に加え、ルータ間でIPsecを用いて暗号化を行うことで通信の遅延が生じるか否かを検討した。

IPsecなしの場合の通信帯域使用量は22.5~25.5Mbpsであり、通信遅延が平均4.5msecで最大27msec生じていた。Table 2に通信遅延と帯域使用量のサマリーを示す。IPsecありの場合の通信帯域使用量は33.0~37.5Mbpsであり、通信遅延が平均12.5msecで最大37msec生じていた（表1）。

●結論および考察

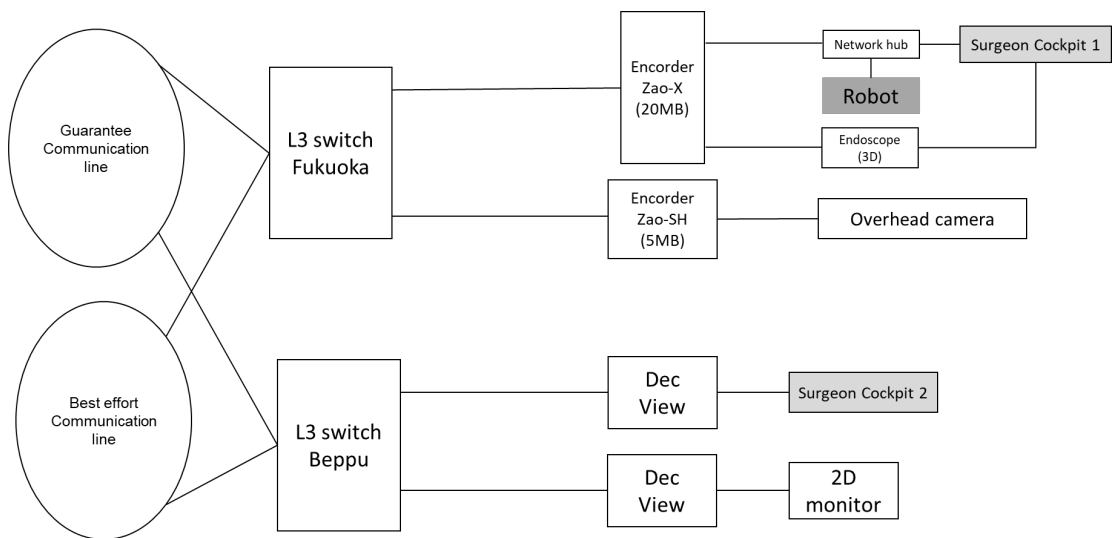
本実証実験では、ダブルコクピットシステムを用いて、現地と遠隔地で手術操作の切り替えがスムーズに行えることを初めて確認した（図1）。非専門医である泌尿器科医が遠隔から指導をうけながら現地で胆のう摘出術を行なった。そのロボットの操作性をGEARS（Global evaluative assessment of robotic skills）とSUS（System usability scale）で評価したところ、専門医が遠隔でロボットを操作するより、良好な結果が得られている（未発表データ）。これは遠隔助手により非専門医でも安心して手術ができていることを示している。また、今回haptic feedback（力覚フィードバック）の有無による腸管把持力の違いを遠隔で確認する試みを行った。力覚フィードバックがあるほうが、術者が弱い把持力で腸管を持ち上げていることが示され、臓器愛護的な操作が行え、本技術が将来遠隔手術における安全性に貢献できる可能性がある。

なお、本ロボットの通信帯域の予測としては、IPsecによる暗号化を行っても1Mbps程度の増加で40Mbpsを超えない予定であった。ところが、IPsecによる暗号化通信を行うと予想以上の帯域の増加と通信の遅延が生じた。IPsecありの構成において転送可能であった最大フレーム長は1,280Bytes（VPNルータのデフォルト値）であり、これを超過するサイズのパケット（全体の約30%弱）が分割されたこと、分割されたパケットが更に再送されたことにより、IPsec無しの構成と比べ、パケット数はおよそ2倍になった。エンコーダ・デコーダから発生する通信の最大フレーム長がルータで転送可能な最大フレーム長を超えていたことに起因しており、機器のMTU値/MSS値をチューニングし暗号化に伴う

パケット分割が発生しない設計をすることで解消できる可能性が高いと考えられる。

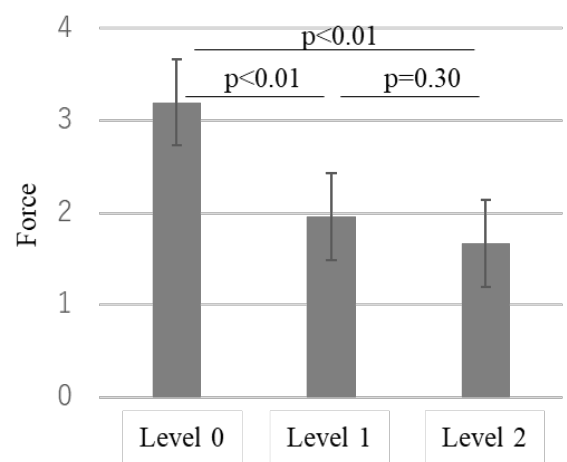
●図表

【図 1：システム構成】



【図 2：力覚フィードバックの有無による術者の把持力の違い】

力覚フィードバックを、なし: Level 0、 弱: Level 1、 強: Level 2 として、その際の術者の把持力をロボットの内部測定機器にて測定した。力覚フィードバック Level 0 では 3.2N、Level 1 では 2.0N、Level 2 では 1.7N であった。



【表 1：通信遅延と帯域使用量のサマリー】

IPsec 通信なしで IP-VPN 回線で作業中の通信帯域使用量は 22.5~25.5Mbps であり、通信遅延が平均 4 msec 程度で、最大は 27msec であった。IPsec ありの場合の通信帯域使用量は 33.0~37.5Mbps であり、通信遅延が平均 12.5msec で最大 37msec 生じていた。

	Ipssec なし				IPsec あり			
	Fukuoka to Beppu (msec)		Beppu to Fukuoka (msec)		Fukuoka to Beppu (msec)		Beppu to Fukuoka (msec)	
遅延 (msec)	minimum	4	minimum	4	minimum	4	minimum	4
	maximum	27	maximum	23	maximum	37c	maximum	36
	average	4.5	average	4.5	average	12.5	average	12.5
帯域量 (Mbps)	22.5-25.5				33.0-37.5			

IPsec: IP Security Architecture、Mbps: Megabit per second

●研究内容掲載論文

- ・ Ota M, Oki E, Nakanoko T, et al.: Field experiment of a telesurgery system using a surgical robot with haptic feedback. Surg Today, 54: 375-381, 2024.
- ・ Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.

実証研究 9 Dual cockpit を用いた遠隔ロボット手術システムにおける 通信遅延の影響

●研究目的

- 遠隔ロボット手術における dual cockpit を用いた遠隔手術指導の通信遅延の許容範囲を評価する。

●研究により明らかになったこと

- hinotori™による dual cockpit を用いた遠隔ロボット手術指導は実用可能である。
- 指導を受ける外科医は 100msec 以上の遅延でも指導効果を得ることができるが、指導をする外科医の通信遅延の許容範囲は 100 msec 以内であった。

●研究環境

- 研究期間：2023 年 2 月 19 日
- 研究施設：メディカロイド社（神戸市 ポートアイランド内）
- 使用回線：疑似遠隔環境回線
- 遠隔手術器材：メディカロイド社製ロボット hinotori™
- 操作対象：生体（ブタ）
- 操作者：ロボット手術に習熟した 8 名の外科医（指導医）と、修練医 8 名（術者）
- 操作内容：ブタに対する遠隔ロボット手術

●研究の背景と目的

ロボット手術が我々にもたらした利点のひとつに、デジタル化された情報を元に様々な技術革新が行われたことがある。Dual cockpit を用いたスワッピングやアノテーション機能を用いた手術教育方法は従来のアプローチ方法では出来なかった手段であり、有用な手術教育方法として標準化されつつある¹⁾。

遠隔ロボット手術システムの問題点のひとつに通信遅延がある。遠隔手術支援を社会実装させるためには、遠隔地から現地の術者に指導を行うためのツールの整備が必須であり、手術支援システムにどれくらい遅延が許容されるかを検証する必要がある。

●検討方法と結果の概要

現地術者に対して遠隔術者が手術支援を行う擬似的な遠隔手術条件下にするためにエンコーダ/デコーダとエミュレータを介して接続した(図 1)。エミュレータで、0msec、50msec、100msec、150msec のエンコーダへの遅延時間挿入を行なった。ブタに対する胃切除術、直腸切除術、胆嚢摘出術を行い、それぞれのロボット操作の評価を行った。

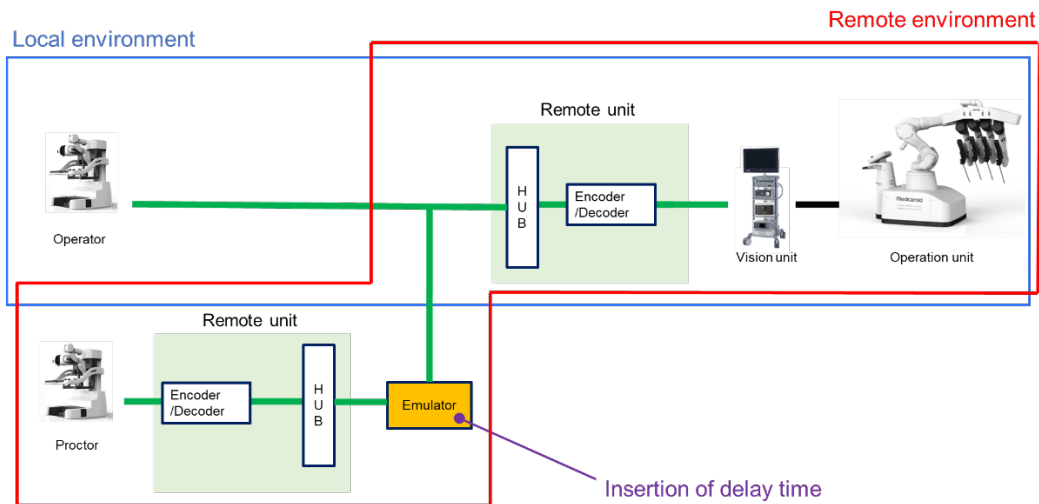
●結論および考察

遠隔指導者は 100msec 以下の遅延であれば遠隔手術指導が可能であるが、150msec 以上の遅延では遠隔手術指導が困難であった。一方、指導を受ける側の現地術者は 200msec の

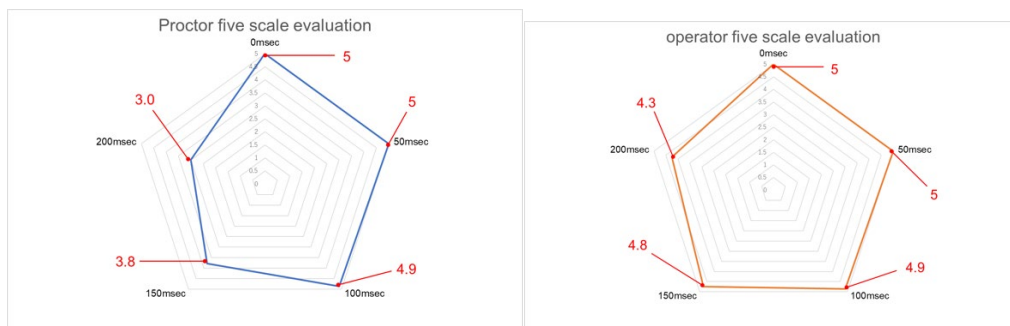
遅延でも指導を受けることは可能と感じ、両者に乖離があることが明らかになった（図2）。

●図表

【図1：模擬遠隔手術システム】



【図2：各遅延における術者・指導者の評価】



●参考文献

- 1) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.

●研究内容掲載論文

- ・ Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Effects of communication delay in the dual cockpit remote robotic surgery system. Surg Today, 54: 496-501: 2024.

実証研究 10 学術情報ネットワークを介した遠隔手術の社会実装に向けた、 3D アノテーションの有効性に関する実証研究

●研究目的

- ・ 商用回線を用いた 3D アノテーションによる遠隔手術の有用性に関する検討

●研究により明らかになったこと

- ・ 3D アノテーションを使用した指導での作業時間の短縮
- ・ 3D アノテーションを使用した指導でのロボット技能評価の改善

●研究環境

- ・ 研究期間：2023 年 3 月 11 日～2023 年 3 月 12 日
- ・ 研究施設：九州大学先端医療イノベーションセンター九州大学病院別府病院
- ・ 使用回線：ソフトバンクギャランティー型回線（IP-VPN, 帯域保証速度 100Mbps）
- ・ 遠隔手術器材：RIVERFIELD 社製ロボット Sroa™、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- ・ 操作対象：ブタ小腸による縫合モデル
- ・ 操作者：医学生、消化器外科医師
- ・ 操作内容：遠隔地にいる消化器外科医から現地の学生へ指導を行い、ブタ小腸に対してマットレス縫合を行った。マットレス縫合の方法についてはあらかじめ模型を使用して説明した。指導方法は事前説明のみ（遠隔地からの指導なし）、音声のみ、2D アノテーション、3D アノテーションの 4 つに分けて行い、それぞれの指導のもと行われたマットレス縫合に要した時間や GEARS（Global Evaluative Assessment of Robotic Skills）を用いたロボット技能評価を行った。

●研究の背景と目的

線や矢印などを画像に書き込むことができる手術アノテーションは、遠隔からの手術指導に必須にシステムである。しかし、線画を 3D の画面に描出することは技術的に難しく、これまでのアノテーションシステムは、ロボットや一部の 3D 画像による手術システムには対応していなかった。今回、RIVERFIELD 社が開発中の 3D に線画を描出可能なアノテーションシステムが、遠隔からの手術指導に有用であるのかどうかについて医学生を対象に確認した。

●検討方法と結果の概要

・検討方法

ロボット操作経験のない 20 人の医学生を、無指導、音声指導、2D アノテーション指導、3D アノテーション指導の 4 群に分類した。無指導群以外は、遠隔地にいる消化器外科医からの指導のもと、ロボットによる垂直マットレス縫合を行った。作業評価は作業時間や縫合の完成度、不成功数、GEARS (Global Evaluative Assessment of Robotic Skills)

などで他覚的に行った。

・結果

- 1) 3D アノテーションを使用した指導では、作業時間が短縮する傾向がみられた（図 1）。
- 2) 3D アノテーションを使用した指導では、縫合のやり直しや針の落下が少なくなる傾向にあった（図 2）。
- 3) 3D アノテーションを使用した指導では、GEARS を用いたロボット操作技能評価がもっとも高いスコアとなった（図 3）。

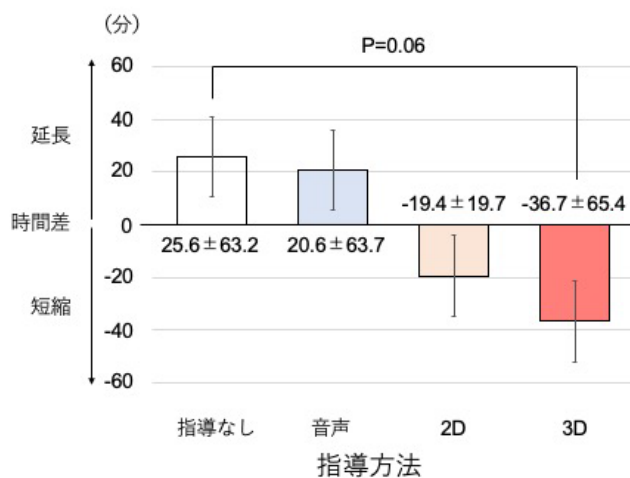
●結論および考察

3D アノテーションを用いた遠隔地からの手術指導は、現地の医師に手技に関する優れた理解力をもたらし、円滑なロボット操作を実現することができた。

●図表

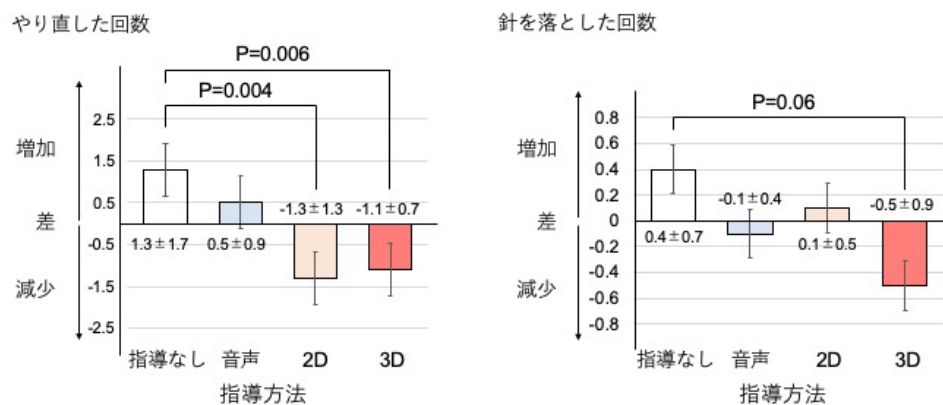
【図 1：マットレス縫合に要した時間】

3D アノテーションによる指導では、指導を行わなかった場合と比較して縫合に要する時間が短縮する傾向にあった(25.6 ± 63.2 vs. -36.7 ± 65.4 分, $P = 0.06$)。



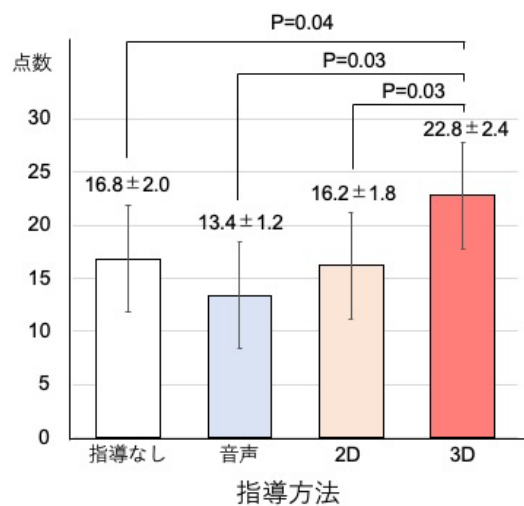
【図 2：縫合のやり直しと針を落下した回数】

3D アノテーションによる指導では、指導を行わなかった場合と比較してやり直す回数が少ない傾向にあった(1.3 ± 1.7 vs. -1.1 ± 0.7 回, $P = 0.006$)。また針の落下回数も少ない傾向がみられた(0.4 ± 0.7 vs. -0.5 ± 0.9 , $P = 0.06$)。



【図3：GEARSによるロボット操作技術の評価】

3D アノテーションを使用した指導では、GEARS を用いたロボット技能評価がもっとも高いスコアとなった。



●参考文献

- 1) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.

●研究内容掲載論文

- ・ Nakanoko T, Oki E, Ota M, et al.: Real-time telementoring with 3D drawing annotation in robotic surgery. Surg Endosc, 37: 9676-9683, 2023.

実証研究 11 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- カダバーに対する hinotori™を用いた完全遠隔幽門側胃切除術・Billroth I 再建術についての検証

●研究により明らかになったこと

- hinotori™を用いた胃癌に準じたリンパ節郭清を伴う完全遠隔ロボット幽門側胃切除術は安全に施行可能である。

●研究環境

- 研究期間：(西暦) 2023 年 3 月 14 日～2023 年 3 月 17 日
- 研究施設：北海道大学臨床解剖実習室、市立釧路総合病院
- 使用回線：帯域保証型 (1G-bps) (NTT East, Tokyo, Japan)
- 遠隔手術器材：hinotori™ (Medicaroid, Kobe, Japan).
- 操作対象：カダバー 1 体
- 操作者：ロボット手術経験者 1 名
- 検証内容：完全遠隔ロボット幽門側胃切除術の検証
- 操作内容：カダバーに対するリンパ節郭清を伴う完全遠隔ロボット幽門側胃切除術

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。今回、北海道大学に献体されたご遺体を用いた遠隔ロボット支援手術の実証研究(カダバースタディー)を行った。本研究の目的は、リンパ節郭清(D2 郭清)を伴う完全遠隔ロボット幽門側胃切除・Billroth I 再建術の実施について、カダバーにて検証することである。なお、本研究は北海道大学病院生命・医学系研究倫理審査委員会の承認を得て施行した(022-0363)。

●検討方法と結果の概要

・方法：

手術支援ロボット hinotori™を直線距離にて約 250 km(回線距離にて約 300 km)離れた北海道大学臨床解剖実習室、および市立釧路総合病院に設置し、完全遠隔手術(北海道大学でのロボット手術を市立釧路総合病院の術者が全て操作)による胃癌に準じたリンパ節郭清(D2)を伴う幽門側胃切除・Billroth I 再建術を施行した。技術評価は Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS: 30 満点)、術者疲労度は Piper fatigue scale-12 (PFS-12: 120 満点で点数が高いほど疲労感が強い)を用いて評価した。通信回線は一般回線を用い、セキュリティ確保対策として IP-VPN 回線に IPsec 暗号を付加している。

・結果：

手術時間は 245 分(コックピット時間 199 分)で、GEARS/PFS-12 は 28/26 であった。

術中の臓器損傷などは認められなかった。手術中の通信途絶や手術映像、ロボット制御に関するトラブルは認められず、通信遅延は平均 40ms(36.5-55ms)であり、通信帯域は 140-150Mbps であった。

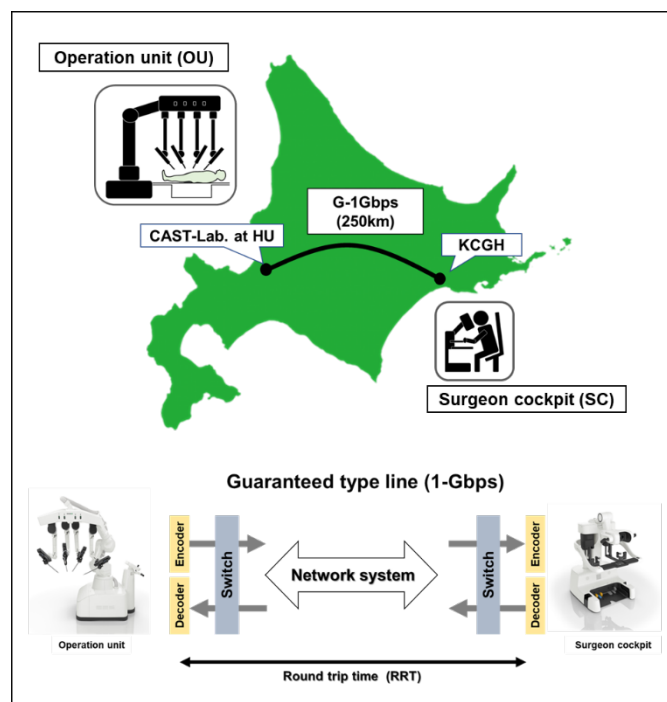
●結論および考察

本研究において、hinotori™ を用いたリンパ節郭清を伴う完全遠隔ロボット幽門側胃切除・Billroth I 再建術が、安全に日常臨床と同等のクオリティで施行が可能であることが確認された。

●図表

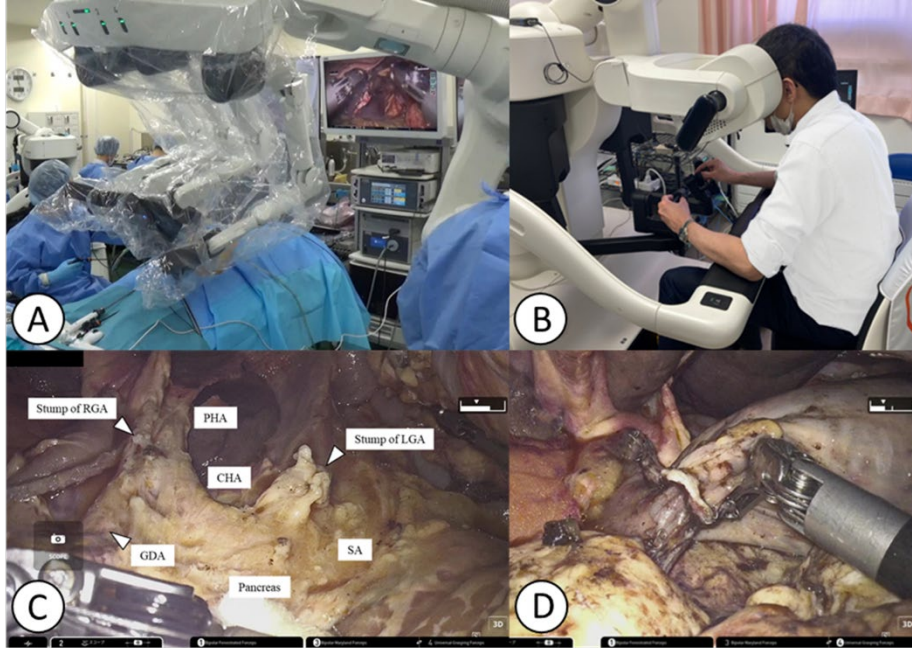
【図 1：カダバースタディーの概要】

(上) 北海道大学臨床解剖トレーニングセンター (CAST-Lab.) のオペレーションユニット (OU) と、直線距離にて約 250km 離れた遠隔地 (釧路市立総合医療センター (KCGH)) のサージョンコックピット (SC)。(下) CAST-Lab の OU と KCGH の SC は、NTT 東日本(東京、日本)が提供する帯域保証型回線 (G-1Gbps) に IPsec (Internet Protocol Security) による暗号化方式で接続した。RTT (Round Trip Time) は通信回線の遅延時間である。



【図2：完全遠隔手術によるリンパ節郭清(D2)を伴う幽門側胃切除・Billroth I 再建術】

A：北海道大学臨床解剖トレーニングセンター（CAST-Lab.）。B：釧路市立総合病院の術者コックピット。C：膈上リンパ節郭清終了時の術野。（CHA：総肝動脈、GDA：胃十二指腸動脈、LGA：左胃動脈、PHA：固有肝動脈、SA：脾動脈、RGA：右胃動脈） D. 体腔内 Billroth-I 再建終了時の術野。（Duo は十二指腸；St は胃）。



●参考文献

- 1) Hakamada K, Mori M, et al.: The changing surgical scene: from the days of Billroth to the upcoming future of artificial intelligence and telerobotic surgery. Ann Gastroenterol Surg, 5: 268-269, 2021.
- 2) Ebihara Y, Oki E, Hirano S, et al.: Tele-assessment of bandwidth limitation for remote robotics surgery. Surg Today, 12: 1-7, 2022.
- 3) Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Reappraisal of telesurgery in the era of high-speed, high-bandwidth, secure communications: evaluation of surgical performance in local and remote environments. Ann Gastroenterol Surg, 7: 167-174, 2023.
- 4) Japanese Gastric Cancer Association: Japanese gastric cancer treatment guidelines 2014 (ver. 4). Gastric Cancer, 20: 1-19, 2017.
- 5) Ebihara Y, Kurashima Y, Murakami S, et al.: Short-term outcomes of robotic distal gastrectomy with the “preemptive retropancreatic approach”: a propensity score matching analysis. J Robot Surg, 16: 825-831, 2022.
- 6) Aghazadeh MA, Jayaratna IS, Hung AJ, et al.: External validation of global evaluative assessment of robotic skills (GEARS). Surg Endosc, 29: 3261-3266, 2015.
- 7) Vassiliou MC, Feldman LS, Andrew CG, et al.: A global assessment tool for evaluation of intraoperative laparoscopic skills. Am J Surg, 190: 107-113, 2005.
- 8) Tanaka A, Graddy C, Simpson K, et al.: Robotic surgery simulation validity and

- usability comparative analysis. *Surg Endosc*, 30: 3720-3729, 2016.
- 9) Bangor PT, Kortum, Miller JT, et al.: Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *J Usability Stud*, 4: 114-123, 2009.
- 10) Reeve BB, Stover AM, Alfano CM, et al.: The piper fatigue scale-12 (PFS-12): psychometric findings and item reduction in a cohort of breast cancer survivors. *Breast Cancer Res Treat*, 136: 9-20, 2012.
- 11) 日本内視鏡外科学会ガイドライン委員会（編）. 2023 年版 技術認定取得者のための内視鏡外科診療ガイドライン. 日本内視鏡外科学会, 2023. Available from: <https://minds.jcqh.or.jp/summary/c00853/>
- 12) Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al.: Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 413: 379-380, 2001.
- 13) Kimmig R, Verheijen RHM, Rudnicki M, et al.: Robot assisted surgery during the COVID-19 pandemic, especially for gynecological cancer: a statement of the Society of European Robotic Gynaecological Surgery (SERGS). *J Gynecol Oncol*, 31: e59, 2020.
- 14) Nankaku A, Tokunaga M, Yonezawa H, et al.: Maximum acceptable communication delay for the realization of telesurgery. *PLOS ONE*, 17: e0274328, 2022.

●研究内容掲載論文

- ・ Ebihara Y, Hirano S, Kurashima Y, et al.: Tele-robotic distal gastrectomy with lymph node dissection on a cadaver. *Asian J Endosc Surg*, 17: e13246, 2024.

実証研究 12 複数の通信回線を用いたロボット遠隔手術の通信冗長性の確保と 遠隔手術指導システムの確立

●研究目的

日本の通複数の信事業体の通信回線を用いた遠隔ロボット手術指導システムの構築と、通信遮断時の複数の通信事業体の回線による冗長性を構築する。

●研究により明らかになったこと

- 国内の通信回線と Saroa™による遠隔手術指導システムの構築が可能である
- 通信遮断時に国内の異なる複数の通信事業体の回線を用いた冗長構成の構築が可能である

●研究環境

- 研究期間：2023 年 3 月 18 日-3 月 21 日
- 研究施設：弘前大学医学部附属病院—むつ総合病院
- 使用回線：ソフトバンク株式会社、NTT 東日本株式会社、東北インテリジェント通信社の 3 社が提供する通信回線を用いた。
- 遠隔手術器材：手術支援ロボット Saroa™ (RIVERFIELD 社)、ソリトン社製エンコーダ・デコーダ
- 操作対象：人工臓器モデル（胆嚢摘出モデル）
- 操作者：Local 環境下の修練医 14 人、Remote 環境下の専門医 4 人
- 操作内容：人工臓器モデルを用いた模擬遠隔ロボット手術

●研究の背景と目的

これまでにロボット遠隔手術の社会実装に向けた実証実験において、複数の国産ロボットが国内の通信回線を利用した遠隔手術を実現できることを示した¹⁻³⁾。一方、今後、解決すべき課題のひとつとして通信遮断時の遠隔手術の継続性の問題があり、特に、手術経験の浅い術者に対する遠隔地からの手術支援中の通信遮断は手術患者の命に関わるため、安定した通信環境を維持し、通信遮断時の通信の冗長性を担保することが必要である。通信障害は災害時をはじめ、様々な理由で突然に起こりうるが、これまでは NTT 東日本の回線のみで検討されてきた⁴⁾。通信セキュリティを強固にするためには、様々な通信事業者による検討が必要である。

●検討方法と結果の概要

弘前大学病院（青森県弘前市）と弘前市から北へ 150km 離れたむつ総合病院（青森県むつ市）をソフトバンク社、NTT 東日本、東北インテリジェント社が提供する 3 社の通信回線を用いて Saroa™を用いた遠隔ロボット手術システムを構築した。Local 環境下の修練医 14 人に対し、Remote 環境下の専門医 4 人による遠隔指導医の介入による遠隔手術指導を

行った。

通信環境は、通信事業者 3 社のうち 2 社の回線をそれぞれ組み合わせ、冗長構成を構築した。複数の通信会社の通信回線を同時に使用した環境でロボット遠隔手術を施行し、人為的に 1 社ずつ回線遮断、復帰を繰り返した。その間に手術環境や画質の変化、ロボットの操作性について評価し、複数の通信会社による遠隔手術の冗長構成の構築が可能かどうかを検証した。

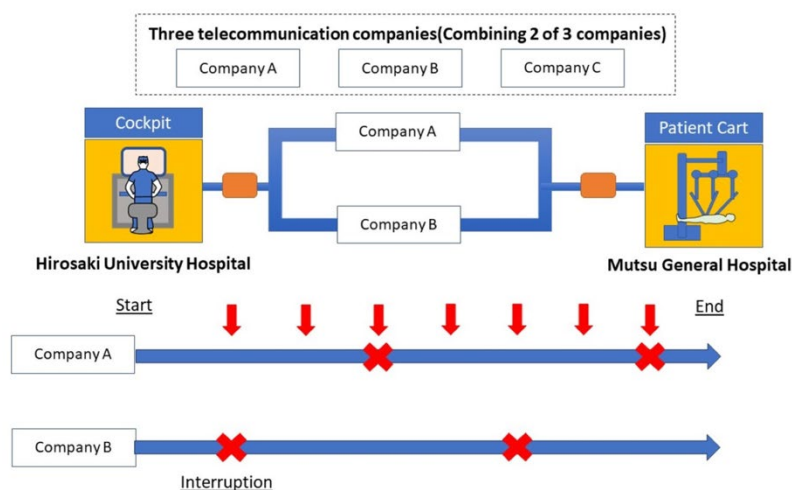
その結果、通信遮断時に遠隔術者は回線の切り替えによる変化を感じず、手術操作継続に影響をきたす通信画質の乱れや、手術タスクへの影響はなかった。

●結論および考察

複数の通信回線を組み合わせた冗長構成により、通信遮断に備えた遠隔手術指導が可能となることが示された。

●図表

【図 1：システム構成】



●参考文献

- 1) Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Reappraisal of telesurgery in the era of high-speed, high-bandwidth, secure communications: Evaluation of surgical performance in local and remote environments. Ann Gastroenterol Surg, 7: 167-174, 2023.
- 2) Ebihara Y, Hirano S, Takano H, et al.: Technical evaluation of robotic tele-cholecystectomy: a randomized single-blind controlled pilot study. J Robot Surg, 17: 1105-1111, 2023.
- 3) Ebihara Y, Hirano S, Kurashima Y, et al.: Tele-robotic distal gastrectomy with lymph node dissection on a cadaver. Asian J Endosc Surg, 17: e13246, 2024.
- 4) Morohashi H, Hakamada K, Kanno T, et al.: Construction of redundant communications to enhance safety against communication interruptions during robotic remote surgery. Sci Rep, 13: 10831, 2023.

●研究内容掲載論文

- ・ Wakasa Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Ensuring communication redundancy and establishing a telementoring system for robotic telesurgery using multiple communication lines. J Robot Surg, 18: 9, 2024.

実証研究 13 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- カダバーに対する hinotori™を用いた遠隔手術支援によるロボット支援下食道切除術について検証する。

●研究により明らかになったこと

- hinotori™を用いた食道癌に準じた縦隔リンパ節郭清を伴うロボット食道切除術は、遠隔手術支援により安全に施行可能である。

●研究環境

- 研究期間：(西暦) 2023 年 11 月 3 日～2023 年 11 月 6 日
- 研究施設：北海道大学臨床解剖実習室、市立釧路総合病院
- 使用回線：帯域保証型 (1G-bps) (NTT East, Tokyo, Japan)
- 遠隔手術器材：hinotori™ (Medicaroid, Kobe, Japan)
- 操作対象：カダバー2 体
- 操作者：ロボット手術経験者 2 名、未経験者 1 名
- 検証内容：遠隔手術支援によるロボット食道切除術の検証
- 操作内容：カダバーに対する遠隔手術支援による縦隔リンパ節郭清を伴うロボット食道切除術

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。食道癌の手術教育における問題点として、手術症例数が少なく類似する術式がない、重大な合併症が起こり得るなどが挙げられる。特に高難度手術であるロボット食道切除術(robotic assisted minimally invasive esophagectomy, RAMIE)においては、その経験を積むことは難しい。ロボット手術における遠隔支援が可能となれば、その意義は大きい。今回、北海道大学に献体されたご遺体を用いた遠隔手術支援によるロボット手術の実証研究(カダバースタディー)を行った。

本研究の目的は、遠隔手術支援によるリンパ節郭清(縦隔リンパ節郭清)を伴うロボット食道切除術の実施について、カダバーにて検証することである。なお、本研究は北海道大学病院生命・医学系研究倫理審査委員会の承認を得て施行した(022-0363)。

●検討方法と結果の概要

・方法：

手術支援ロボット hinotori™を直線距離にて約 250 km(回線距離にて約 300 km)離れた北海道大学臨床解剖実習室(CAST-Lab)、および市立釧路総合病院に設置し、ご遺体 2 体を CAST-Lab に設置し、ダブルコックピットを用いた遠隔手術支援(北海道大学でのロボット手術を市立釧路総合病院の遠隔術者が一部操作を交代する)による食道癌に準じたリンパ

節郭清（縦隔リンパ節郭清）を伴う RAMIE を 2 回施行した。遠隔術者は日本内視鏡外科学会のロボットプロクタ認定医 1 名であり、現地術者は、ロボット手術経験者と未経験者の 2 名で行った。技術評価は Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS: 30 満点) 、術者疲労度は Piper fatigue scale-12 (PFS-12 : 120 満点で点数が高いほど疲労感が強い) を用いて評価した。通信回線は一般回線を用い、セキュリティ確保対策として IP-VPN 回線に IPsec 暗号を付加している。

・結果：

手術時間/遠隔操作指導回数は、術者 1（ロボット手術未経験者）:152 分/11 回、術者 2（ロボット手術経験者）:154 分/15 回であり、GEARS/PFS-12 は、術者 1 :24/23、術者 2 :24/38 であった。術中の臓器損傷などは認められなかった。通信途絶や手術映像、ロボット制御に関するトラブルは認められず、通信遅延は平均 13.1ms、通信帯域は 23-140Mbps であった。

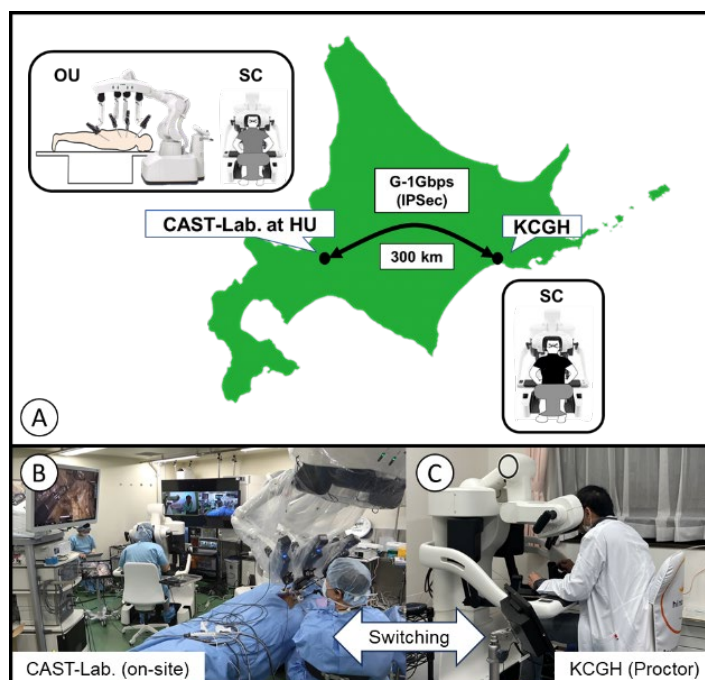
●結論および考察

本カダバースタディーでは遠隔手術支援による RAMIE は安全に実施可能であった。遠隔手術支援が、ロボット手術の安全性や教育効果の向上において有益な手段となり得ることが示唆された。

●図表

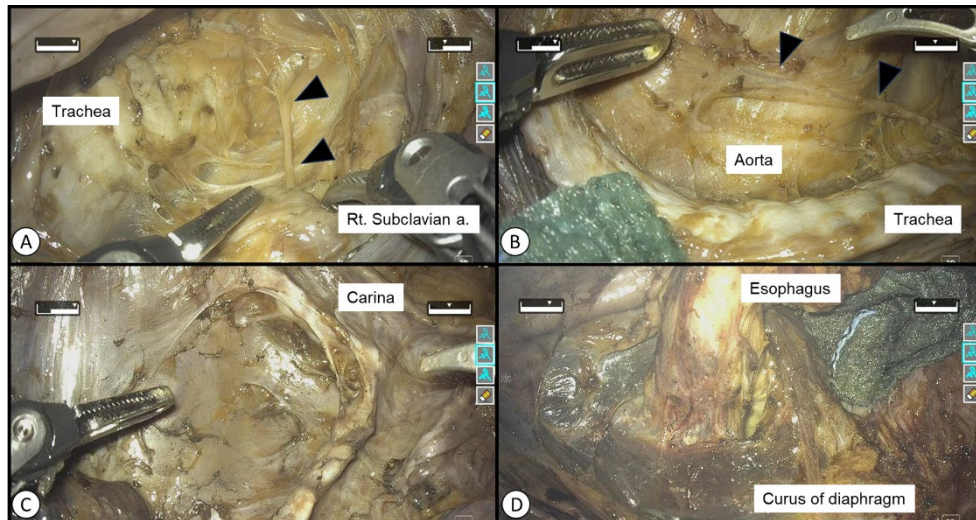
【図 1：ダブルコックピットを用いた遠隔手術支援による腹臥位ロボット食道切除術】

A: 北海道大学臨床解剖実習室(CAST-Lab)と回線距離にて約 300km 離れた遠隔地（市立釧路総合病院 (KCGH)）を NTT 東日本（東京、日本）が提供する帯域保証型回線（G-1Gbps）に IPsec（Internet Protocol Security）による暗号化方式で接続した。B: CAST-Lab.にオペレーションユニット（OU）と現地術者用サージョンコックピット（SC）を配置。C: KCGH に指導者用 SC を配置し、操作権を移行しながらロボット食道切除術を施行した。



【図2：遠隔手術支援によるロボット食道切除術の郭清後の術野】

A：右反回神経周囲リンパ節郭清後。B：左反回神経周囲リンパ節郭清後。C：中縦隔リンパ節郭清後。D：下縦郭リンパ節郭清後。



●参考文献

- 1) Mori M, Hirano S, Hakamada K, et al.: Clinical practice guidelines for telesurgery 2022: Committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society. Surg Today, 54: 817-828, 2024.
- 2) Ebihara Y, Hirano S, Kurashima Y, et al.: Tele-robotic distal gastrectomy with lymph node dissection on a cadaver. Asian J Endosc Surg, 17: e13246, 2024.
- 3) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.
- 4) 日本内視鏡外科学会ガイドライン委員会（編）. 2023 年版 技術認定取得者のための内視鏡外科診療ガイドライン. 日本内視鏡外科学会, 2023. Available from: <https://minds.jcqh.or.jp/summary/c00853/>
- 5) Yamamoto H, Ebihara Y, Tanaka K, et al.: Robot-assisted thoracoscopic esophagectomy for gastrointestinal stromal tumor of the esophagus: A case report. Int J Surg Case Rep, 86: 106335, 2021.
- 6) Aghazadeh MA, Jayaratna IS, Hung AJ, et al.: External validation of global evaluative assessment of robotic skills (GEARS). Surg Endosc, 29: 3261-3266, 2015.
- 7) Reeve BB, Stover AM, Alfano CM, et al.: The piper fatigue scale-12 (PFS-12): psychometric findings and item reduction in a cohort of breast cancer survivors. Breast Cancer Res Treat, 136: 9-20, 2012.

- 8) Pickering OJ, van Boxel GI, Carter NC, et al.: Learning curve for adoption of robot-assisted minimally invasive esophagectomy: a systematic review of oncological, clinical, and efficiency outcomes. *Dis Esophagus*, 36: doac089, 2023.
- 9) Hue JJ, Bachman KC, Worrell SG, et al.: Outcomes of robotic esophagectomies for esophageal cancer by hospital volume: an analysis of the national cancer database. *Surg Endosc*, 35: 3802-3810, 2021.
- 10) Motoyama S, Yamamoto H, Miyata H, et al.: Impact of certification status of the institute and surgeon on short-term outcomes after surgery for thoracic esophageal cancer: evaluation using data on 16,752 patients from the National Clinical Database in Japan. *Esophagus*, 17: 41-49, 2020.

●研究内容掲載論文

- Ebihara Y, Hirano S, Shichinohe T, et al.: Tele-robot-assisted minimally invasive esophagectomy using a double-surgeon cockpit on a cadaver. *Surg Today*, 5: 1335-1339, 2025.

実証研究 14 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- Saroa™を用いた緊急時の実証実験

●研究により明らかになったこと

- Saroa™を用いた遠隔操作時に発生した緊急事態に対し、シミュレーションを行うことで現地同様に対応可能であることが示唆された。

●研究環境

- 研究期間：(西暦) 2024 年 2 月 21 日～2024 年 2 月 22 日
- 研究施設：北海道大学臨床解剖実習室、クリニカルシミュレーションセンター
- 使用回線：帯域保証型 (1G-bps) (NTT East, Tokyo, Japan)
- 遠隔手術器材：Saroa™ (Riverfield, Inc., Tokyo, Japan).
- 操作対象：胆嚢モデル
- 操作者：ロボット手術経験者 2 名
- 検証内容：遠隔操作時における緊急時対応についての検証
- 操作内容：遠隔操作時に通信遮断・電源消失・大量出血時を想定した対応につき、検証を行った。

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。遠隔手術の際の緊急時対応についての検証は行っていないため、臓器モデルにて遠隔操作時の通信遮断・電源消失・大量出血時のそれぞれについて、シミュレーションを実施し、その実際を検証した。

●検討方法と結果の概要

・方法：

手術支援ロボット Saroa™を北海道大学臨床解剖実習室 (CAST-Lab) と回線距離にして約 5 km離れた北海道大学シミュレーションセンターに設置し、胆嚢モデルを CAST-Lab に設置した。胆嚢摘出手順は以下の 4 つのステップにて施行した。Step 1. 現地術者：電気メス (ハサミ鉗子) を用いて胆嚢管を剥離後にクリップし、ハサミ鉗子にて胆嚢管切離 (操作権の切り替え：現地⇒遠隔操作) Step 2. 遠隔術者：胆嚢動脈も同様に剥離後にクリップし、ハサミ鉗子にて胆嚢動脈切離 (操作権の切り替え：遠隔⇒現地操作) Step 3. 現地術者：前半の胆嚢剥離 (操作権の切り替え：現地⇒遠隔操作) Step 4. 遠隔術者：後半の胆嚢剥離。ダブルコックピットを用いた遠隔手術操作時の緊急対応について、①遠隔操作時 (Step 4.) における通信遮断時、②電源喪失時 (Step 4) ならびに③大量出血時 (Step 2) を想定して検証を行った。事前にロボット動作停止時の腹腔鏡手術への移行ならびに通信途絶時の携帯電話

による通信継続などの対応マニュアルを作成した。ロールアウトから腹腔鏡操作移行までの時間、手術終了（胆嚢摘出）までの時間を計測した。通信回線は一般商用回線を使用し、セキュリティ対策として IPsec による暗号化を付加した IP-VPN 回線を用いた。

・結果：

緊急事態発生時からロールアウトまでの所要時間は、通信遮断で 60 秒、電源喪失で 120 秒、大量出血で 120 秒であり、手術時間は、通信遮断で 660 秒、電源喪失で 730 秒、大量出血で 720 秒であった。全ての緊急時においても事前に作成した対応マニュアル通りに作業を行うことが可能であった。

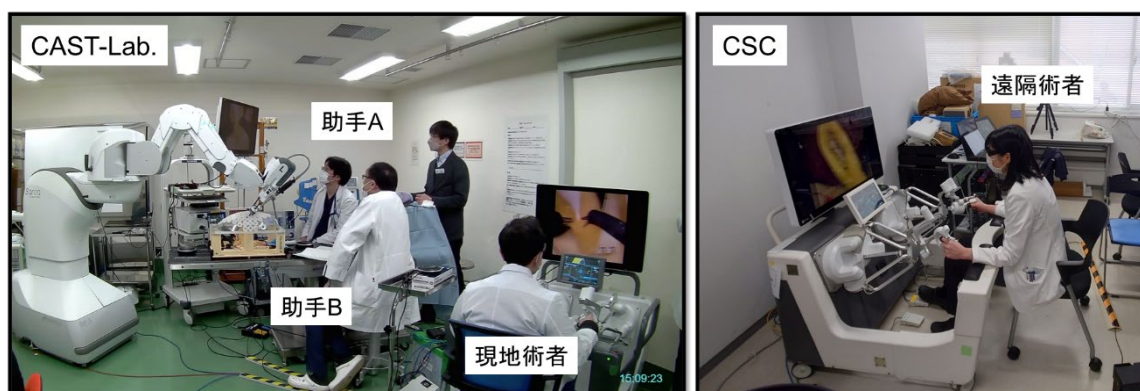
●結論および考察

現地術者と遠隔指導者との手術室内映像の共有は緊急時の対応に有用であった。また、WEB 会議システムの通信遮断時には携帯電話（TV 電話）による現地術者と遠隔術者間の通話により情報の共有が可能であり、有用であった。

●図表

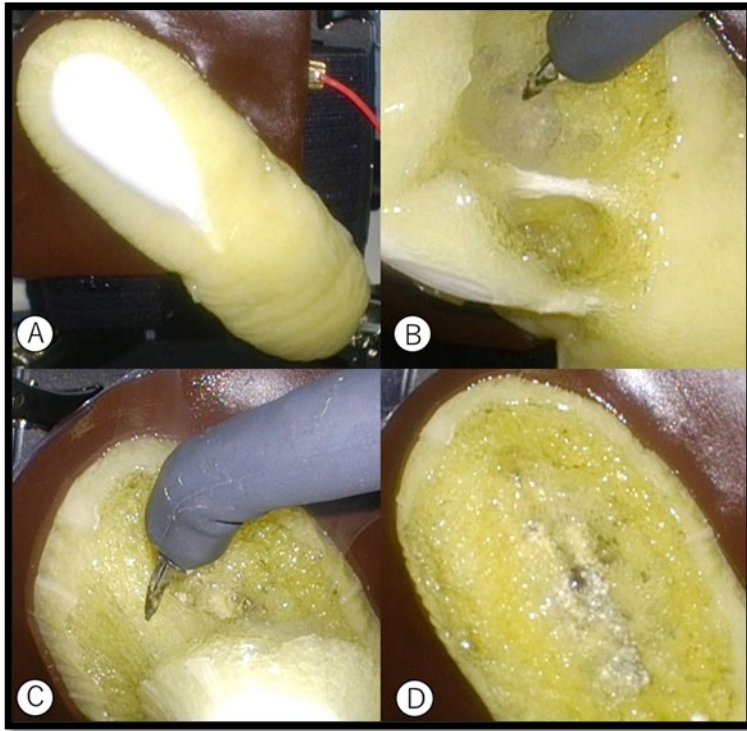
【図 1：ダブルロックピットを用いた遠隔手術支援時の緊急シミュレーション】

手術支援ロボット Sarioa™ を北海道大学臨床解剖実習室（CAST-Lab）と回線距離にして約 5 km 離れた北海道大学シミュレーションセンター(CSC)に設置した。



【図 2：胆嚢モデルを使用した胆嚢摘出術】

Step 1. 現地術者：電気メス（ハサミ鉗子）を用いて胆嚢管を剥離後にクリップし、ハサミ鉗子にて胆嚢管切離（操作権の切り替え：現地⇒遠隔操作）、Step 2. 遠隔術者：胆嚢動脈も同様に剥離後にクリップし、ハサミ鉗子にて胆嚢動脈切離（操作権の切り替え：遠隔⇒現地操作）、Step 3. 現地術者：前半の胆嚢剥離（操作権の切り替え：現地⇒遠隔操作）、Step 4. 遠隔術者：後半の胆嚢剥離



A：胆嚢モデル、B：胆嚢動脈、C：胆嚢剥離、D：切除後

●参考文献

- 1) 日本内視鏡外科学会ガイドライン委員会（編）. 2023 年版 技術認定取得者のための内視鏡外科診療ガイドライン. 日本内視鏡外科学会, 2023. Available from: <https://minds.jcqh.or.jp/summary/c00853/>

●研究内容掲載論文

論文作成中

実証研究 15 8K 映像伝送に次世代型遠隔手術の概念実証

●研究目的

- 8K 腹腔鏡映像の伝送による遠隔地からの手術指導の有効性の検証、ならびに技術的要件を求める

●研究により明らかになったこと

- 臨床試験時の通信遅延は 252～350 ミリ秒の範囲であったが、遠隔手術指導時のコミュニケーションに違和感はなく、スムーズに意思疎通が行われた。

●研究環境

- 研究期間：①2024 年 5 月 8，9 日、②2025 年 2 月 13 日
- 研究施設：がんセンター中央病院（東京築地）、ソフト産業プラザ TEQS（大阪住之江区）
- 使用回線：東京－大阪間（本線：1Gbps 専用線、予備：共用線 1Gbps VPN）
※臨床試験②では、東京および大阪の施設内それぞれにローカル 5G 伝送路を挿入
- 遠隔手術器材：8K 腹腔鏡
- 操作対象：大腸がん患者への臨床試験
- 操作者：執刀医：加藤岳晴医師、助手：田蔵昂平医師、指導医：森谷弘之介医師
- 操作内容：指導医が大阪の指導室 8K モニター上へのあのーションと音声により腹腔内の切除部位等の位置を指示し、手術室の執刀医および助手がモニター上のアノーションと音声にしたがって指示内容を実行し手術を進めた。

●研究の背景と目的

外科医あるいは内視鏡手術の専門医不足、とりわけベテランの腹腔鏡手術専門医の地域的偏在が課題となっている。その課題を緩和するため、8K 腹腔鏡手術映像を専門医充足地域の病院に伝送し、専門医の手術指導を受けながら手術を実施する 8K 遠隔手術指導の有効性を検証するとともに、その技術的要件を求める。

●検討方法と結果の概要

- 実施場所：東京・築地のがん研究センター中央病院（手術側）と大阪・住之江区のソフト産業プラザ TEQS（指導側）
- 設備・装置：8K 腹腔鏡手術システム
- 使用回線：東京－大阪間（本線：1Gbps 専用線、予備：共用線 1Gbps VPN）
臨床試験①：2024 年 5 月に有線回線のみで 3 例実施
臨床試験②：2025 年 2 月に上記有線回線に東京、大阪の施設内でローカル 5G 伝送路を挿入し 2 例実施
- 遅延測定結果：

臨床試験①：350 ミリ秒

臨床試験②：1 例目は上りのみにローカル 5 G を挿入し遅延 252 ミリ秒。2 例目は下りのみにローカル 5 G を挿入し遅延 264 ミリ秒（ローカル 5G のメーカーの違い。有線系のみでは 250 ミリ秒）

・映像伝送レート：

臨床試験①：100Mbps、臨床試験②：90Mbps

・結果：

- ・遠隔手術指導の時間割合：95.4%、周術期合併症は 1 例も認めなかった。遅延に関連する医師のコメント：「いずれの試験においても遠隔手術指導は非常にスムーズに行われ、違和感はなかった。」
- ・映像伝送レート：臨床試験①、②とも所要条件である「80Mbps 以上」を満足する。ローカル 5G を用いた臨床試験②で伝送レートを①より下げているのはローカル 5G の許容帯域に対するマージンを広げるためである。

●結論および考察

臨床試験で用いたシステムの遅延量は、いずれも先行研究での主観評価実験結果の評価 5（遅れを感じない：遅延量 389msec）を満足し、十分低値となった。執刀医および指導医ともに、「指導は非常にスムーズで、指導時に違和感はなかった」とのコメントであった。

なお、用いたシステムでは腹腔鏡をスコープホルダに保持した状態で手術を行うため、映像と指導医が描画するアノテーションがずれないという特徴がある。従って、遠隔術者から現地術者へのフィードバック情報はアノテーション情報と音声のみであり、伝送負荷の大きい映像はフィードバックする必要がない。従って、通信回線の伝送遅延は一方のみ考慮すればよい点に留意する必要がある。

●参考文献

- 1) Ito T., Kanemitsu Y, Moritani K, Shimamoto H, et al.: Development of 8K Laparoscopic Surgery System with Real-time Telementoring and Analysis of its Effectiveness. Proc. Int. Display Workshops, 30, 2023

●研究内容掲載論文

- ・Shimamoto H, Kanemitsu Y, Moritani K, et.al.: Clinical Trial using 8K Laparoscopic Surgery System with Real-Time Telementoring. Tech Rep, 49: 12-15, 2025.

<参考資料> 8K スーパーハイビジョン技術を用いた新しい遠隔手術支援型内視鏡 (硬性鏡) 手術システムの開発

●研究目的

- 8K 腹腔鏡映像伝送による遠隔手術指導の許容遅延量と 8K 伝送の所要帯域を主観評価実験により求める

●研究により明らかになったこと

- 5 段階連続尺度で 4 (遅れはあるが気にならない) 以上となるのは映像遅延が 1.3 秒以下。すなわち概ね 1 秒以内の遅延であれば遠隔指導の意思疎通はスムーズに行える。
- 8K の圧縮伝送レートが 80Mbps (1 秒あたりのメガビット転送量) 以上であれば、原画と区別がつかない画質である (H.265 コーデックシステムの場合)

●研究環境

- 研究期間：2021 年 3 月 23 日
- 研究施設：(株) アイビーテック (成田動物実験施設)
- 使用回線：手術室の 8K 腹腔鏡カメラと指導室の 8K モニターを LAN ケーブルにより直結
- 遠隔手術器材：8K 腹腔鏡
- 操作対象：ブタ大腸手術
- 操作者：金光秀幸医師、塚本俊介医師、森谷弘之介医師、永田洋士医師ほか (5 名)
- 操作内容：指導医が指導室側 8K モニター上へのアノテーションと音声により腹腔内の位置を指示し、手術室の執刀医および助手がモニター上のアノテーションと音声にしたがって指示内容を実行するというタスクにおいて、意思疎通のしやすさを指導医、執刀医、助手の立場で 5 段階で評価
- 上記手術の収録映像を種々の符号化率で符号化し原画と比較 (事後)

●研究の背景と目的

8K 遠隔手術指導システムを構築する際の所要条件のうち、伝送に伴う映像遅延の所要条件を求める。

●検討方法と結果の概要

1) 許容伝送遅延について

手術室と指導室に分かれ、手術室の 8K 腹腔鏡映像をイーサネットでは指導室に伝送した。伝送された 8K 映像を見ながら音声とアノテーションを手術室に伝送 (遅延ゼロと仮定) して手術室の医師 (執刀医・助手) が音声およびアノテーションの指導に基づきメスを動かすタスクを設定した。映像伝送の遅延量を種々変更し遅延量が意思疎通のしやすさにどのような影響を与えるかを、連続尺度主観評価で定量化した。尺度は以下の通り。5：遅れを

感じない、4：遅れはあるが気にならない、3：送れるが支障はない、2：遅れのため疎通しにくい、1：遅れのためまったく疎通できない。

2) 映像の許容伝送レートについて

種々の符号化率で動物実験での内視鏡映像を圧縮し、それらの映像と元の映像とを時系列で提示して対比較し、差を検出できるかどうかを主観評価した結果、70Mbps 以上であれば原画との差はわからないという結果を得た（評価者：医療従事者、N = 3）（図 1）。

一方、信号対ノイズ電力比（PSNR）を各伝送レートで求めると、図 2 に示すように、70Mbps 付近の右側ではほぼ平坦であり「元画像と差がわからない」という主観評価結果を裏付ける。他の画像でも同様の傾向を示した。

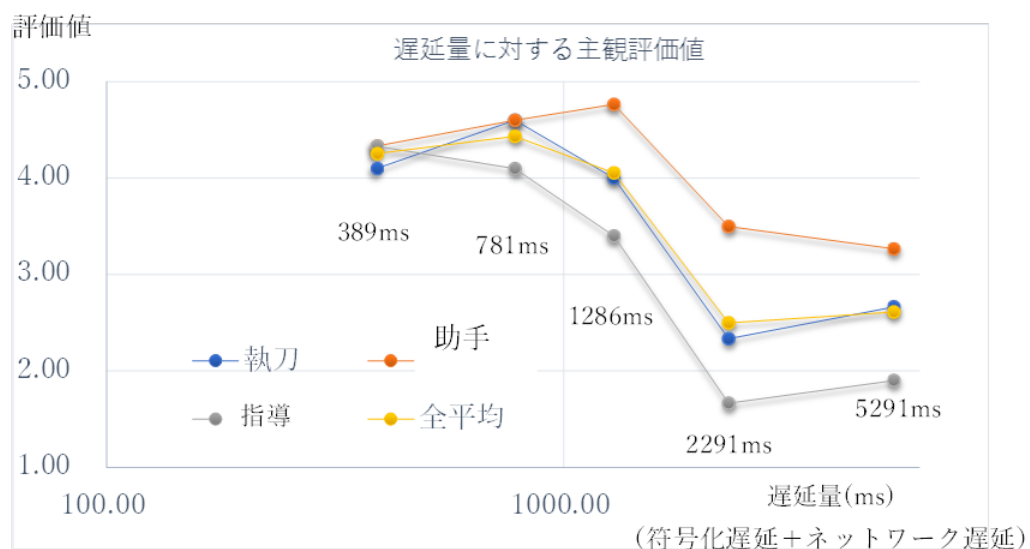
●結論および考察

この実験では、遅延量と意思疎通のしやすさに関する主観評価値との間に図 1 の関係がみられた。主観評価で 4 以上すなわち遅延量では 1.3 秒以下であれば意思疎通に問題が生じないと理解される。

また、映像の伝送レートについては、N が 3 ではあるが、70Mbps 以上であれば原画との差がわからないとの結果であり、PSNR の結果もそれを裏付ける。ここでは安全を見込んで、所要伝送レートを 80Mbps 以上とする。現在、BS 4 K/8K の衛星放送においてもほぼ同等の伝送レートで放送されていることから、妥当な結論と考えられる。

●図表

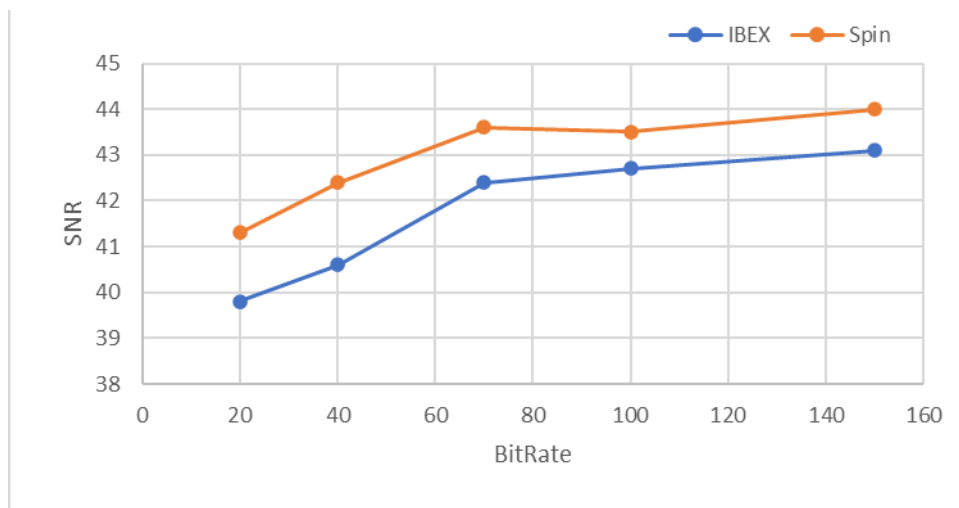
【図 1：遠隔指導時の映像伝送遅延による意思疎通主観評価実験の結果】



評価語（5段階連続尺度）

5: 遅れを感じない、4:遅れはあるが気にならない、3:遅れるが疎通に支障はない、2: 遅れのため疎通しにくい、1:遅れのためまったく疎通できない

【図2：8K 腹腔鏡映像の伝送レートと信号対ノイズ比】



●研究内容掲載論文

- ・伊藤 崇之, 金次 保明, 山崎 順一, 他：遠隔支援型 8K 腹腔鏡手術システムの開発と 5G 網を利用した検証実験. 映像情報メディア学会技術報告, [46 : 5-8, 2022.](#)

実証研究 16 手術支援ロボットを用いた遠隔手術時の緊急時対応プロセスの検証

●研究目的

- 遠隔手術支援の運用マニュアル及び緊急対応マニュアルを作成するために遠隔手術の通常対応と緊急対応シミュレーションを行い、問題点を抽出する。

●研究により明らかになったこと

- 遠隔手術時の通信回線遮断時や電源喪失時の手術支援ロボットシステムの挙動
- 緊急時に行うべきスタッフの対応
- 緊急対応マニュアルに記載すべき事項
- 手術支援ロボットや通信機器の種類により対応が異なることに留意する必要がある。

●研究環境

- 研究期間：2024 年 7 月 26 日
- 研究施設：(メディカロイド株式会社 本社)
- 使用回線：メディカロイド社内の通信回線
- 遠隔手術器材：hinotori™ (Medicaroid, Kobe, Japan).
- 操作対象：胆嚢モデル
- 操作者：ロボット手術経験者 2 名
- 参加スタッフ：麻酔科医師 1 名、臨床工学技士 2 名、看護師 1 名
- 操作内容：遠隔操作時における緊急時対応についての検証
- 操作内容：遠隔手術実施時の準備、遠隔手術実施時に出血による開腹移行／通信遮断／電源喪失による手術支援ロボット停止を想定した対応について、検証を行った。

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され¹⁾、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。参考資料として、運用マニュアル、緊急対応マニュアルを整備するため、課題の抽出を行った。

●検討方法と結果の概要

・検討方法：

疑似遠隔手術システムを構築し、起こりうる各種のトラブルのシナリオに対し、緊急時における各医療従事者のプロセスを検証した。

1) 術中大量出血や心筋梗塞などの不測な急変時に対する緊急対応

麻酔科医、遠隔術者、現地術者、現地助手、現地看護師、現地臨床工学技士の緊急時におけるコミュニケーション方法や緊急時対応のプロセスを検証した。

2) 通信遮断による手術支援ロボット停止を想定した術式変更

通信遮断時における遮断原因の調査及び遠隔地コックピットと現地ロボットの振る舞いを検証した。遠隔／現地の手術支援ロボットの復旧を行い、遠隔手術支援継続可否の判断プロセスを検証した。また遠隔手術支援継続不可を想定し、現地スタッフによるロールアウト及び術式変更のプロセスを検証した。

・結果の概要：

① 通信の切断時の現象

ロボット通信回線の切断時は遠隔のコックピットと現地のロボットの両方が停止した。対処方法は手術支援ロボットを再起動することで、現地の手術支援ロボットが作動するようになった。

Web 会議システム装置の回線切断時は手術支援ロボットの通信接続が継続している場合は現地術者と遠隔術者の間でコミュニケーションが可能なため、手術に影響がなかった。

両方の回線が切断した際には携帯電話でのコミュニケーションが必要となった。

② 電源の切断の現象

現地手術支援ロボットの電源喪失時には遠隔コックピットと現地のロボットが同時に停止し、ロボットが動かなくなるため、緊急ロールアウトする必要があった。

遠隔コックピットの電源喪失時と通信装置の電源喪失時には遠隔コックピットと現地の手術支援ロボットの両方が操作不能となったが、手術支援ロボットを再起動することで、現地の手術支援ロボットが作動するようになった。

●結論および考察

急変時は通常のロボット手術時準じ、緊急ロールアウトを行い、他の術式にスムーズに切り替える準備が必要である。大量出血など、予め予想される事態に対しては事前協議で他の術式に変更する基準や対応方法について話し合っておく必要がある。

●図表

なし

●参考文献

- 1) Mori M, Hirano S, Hakamada K, et al.: Clinical practice guidelines for telesurgery 2022 : Committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society. Surg Today, 54: 817-828, 2024.

●研究内容掲載論文

なし

実証研究 17 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- カダバーに対する Saroa™を用いた遠隔手術支援によるロボット回盲部切除術についてその実行性を検証する。

●研究により明らかになったこと

- Saroa™を用いた大腸癌に準じたリンパ節郭清を伴うロボット回盲部切除術は遠隔手術支援によっても安全に施行可能である。

●研究環境

- 研究期間：(西暦) 2024 年 10 月 15 日～2024 年 10 月 16 日
- 研究施設：北海道大学臨床解剖実習室、市立釧路総合病院
- 使用回線：帯域保証型 (1G-bps) (NTT East, Tokyo, Japan)
- 遠隔手術器材：Saroa™ (Riverfield, Inc., Tokyo, Japan).
- 操作対象：カダバー1 体
- 操作者：ロボット手術経験者 1 名
- 検証内容：遠隔支援によるロボット回盲部切除術の検証
- 操作内容：カダバーに対する遠隔手術支援によるリンパ節郭清を伴う遠隔支援ロボット回盲部切除術

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。今回、北海道大学に献体されたご遺体を用いた遠隔ロボット支援手術の実証研究（カダバースタディー）を行った。本研究の目的は、遠隔手術支援によるリンパ節郭清を伴うロボット回盲部切除術の実施について、カダバーにて検証することである。なお、本研究は北海道大学病院生命・医学系研究倫理審査委員会の承認を得て施行した(022-0363)。

●検討方法と結果の概要

・検討方法

手術支援ロボット Saroa™を直線距離にて約 250 km(回線距離にて約 300 km)離れた北海道大学臨床解剖実習室(CAST-Lab)、および市立釧路総合病院に設置し、ご遺体 2 体を CAST-Lab に設置し、ダブルコックピットを用いた遠隔手術支援（北海道大学でのロボット手術を市立釧路総合病院の遠隔術者が一部操作を交代する）による大腸癌に準じたリンパ節郭清（D2 郭清）を伴うロボット回盲部切除術を 1 回施行した。遠隔術者は日本内視鏡外科学会のロボットプロクタ認定医 1 名であり、現地術者は、ロボット手術経験者 1 名で行った。技術評価は Global Evaluative Assessment of Robotic Skills (GEARS: 30 満点)、術者疲労度は Piper fatigue scale-12 (PFS-12: 120 満点で点数が高いほど疲労感が強い)を用いて評価した。通信回線は一般回線を用い、セキュリティ確保対策として IP-VPN 回線に

IPsec 暗号を付加している。

・ 結果の概要：

手術時間/遠隔操作指導回数は、172 分/6 回、GEARS/PFS-12 は、24/19 であった。術中の臓器損傷などは認められなかった。通信途絶や手術映像、ロボット制御に関するトラブルは認められず、通信遅延は平均 7ms、通信帯域は 25Mbps であった。本カダバースタディーでは遠隔手術支援によるロボット回盲部切除術は安全に実施可能であった。

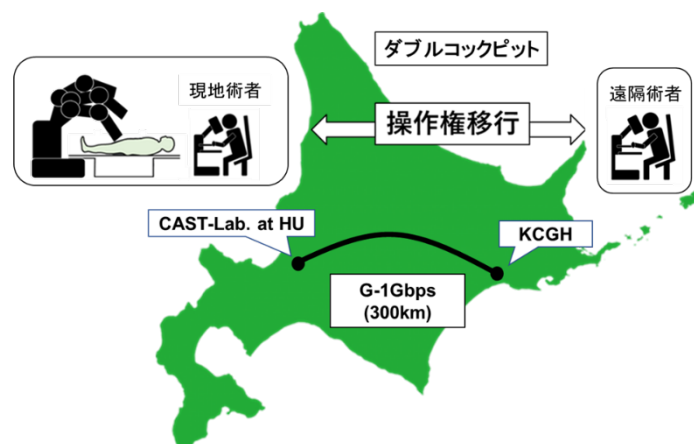
● 結論および考察

遠隔手術支援が、ロボット手術の安全性や教育効果の向上において有益な手段となり得ることが示唆された。

● 図表

【図 1：ダブルコックピットを用いた遠隔手術支援によるロボット回盲部切除術】

A: 北海道大学臨床解剖実習室(CAST-Lab)と回線距離にて約 300km 離れた遠隔地（市立釧路総合病院 (KCGH)）を NTT 東日本（東京、日本）が提供する帯域保証型回線（G-1Gbps）に IPsec(Internet Protocol Security)による暗号化方式で接続した。CAST-Lab.にオペレーションユニットと現地術者用サージョンコックピットを配置し、KCGH に遠隔術者（指導者）用サージョンコックピットを配置し、操作権を移行しながらロボット回盲部切除術を施行した。



北海道大学臨床医解剖実習室 (CAST-Lab.)、市立釧路総合病院 (KCGH)

【図 2：遠隔手術支援によるロボット回盲部術】

左側（釧路）：市立釧路総合病院の手術映像と指導風景。右側（札幌）：北海道大学臨床解剖実習室の手術映像と術野風景。



●参考文献

- 1) Mori M, Hirano S, Hakamada K, Oki E, et al.: Clinical practice guidelines for telesurgery 2022: Committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society. Surg Today, 254: 817-828, 2024.
- 2) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.
- 3) 日本内視鏡外科学会ガイドライン委員会（編）. 2023 年版 技術認定取得者のための内視鏡外科診療ガイドライン. 日本内視鏡外科学会, 2023. Available from: <https://minds.jcqh.or.jp/summary/c00853/>

●研究内容掲載論文

論文作成中

実証研究 18 手術支援ロボットを用いた遠隔手術の実証研究

●研究目的

- カダバーに対する Saroa™を用いた力覚機能の実証実験

●研究により明らかになったこと

- Saroa™における力覚機能は、ロボット手術を行う際の腸管把持において損傷リスクを軽減できる可能性が示唆され、遠隔操作時も同様の効果が確認された。

●研究環境

- 研究期間：(西暦) 2024 年 10 月 15 日～2024 年 10 月 16 日
- 研究施設：北海道大学臨床解剖実習室、市立釧路総合病院
- 使用回線：帯域保証型 (1G-bps) (NTT East, Tokyo, Japan)
- 遠隔手術器材：Saroa™ (Riverfield, Inc., Tokyo, Japan).
- 操作対象：カダバー1 体
- 操作者：消化器外科医 6 名 (現地術者 3 名、遠隔術者 3 名)
- 検証内容：遠隔操作ならびに現地操作における力覚機能の有用性の検証 (単盲試験)
- 操作内容：ロボット鉗子 (両手) を用いた小腸の手繰り寄せ操作を、各力覚設定 (x0,x0.5,x1)にて施行した。

●研究の背景と目的

日本外科学会において「遠隔手術ガイドライン」が策定され、その社会実装に向け準備と実証研究を進めている。今回、北海道大学に献体されたご遺体を用いた遠隔ロボット支援手術の実証研究 (カダバースタディー) を行った。本研究の目的は、手術支援ロボットにおける力覚機能の有用性につき、カダバーにて検証を行うことである。なお、本研究は北海道大学病院生命・医学系研究倫理審査委員会の承認を得て施行した (022-0363)。

●検討方法と結果の概要

・検討方法：

手術支援ロボット Saroa™を回線距離にて約 300 km離れた北海道大学臨床解剖実習室 (CAST-Lab)、および市立釧路総合病院に設置し、ご遺体 1 体を CAST-Lab に設置し、ダブルコックピットを用いた遠隔支援手術において、ロボット鉗子による腸管把持操作を実施した。現地術者 (CAST-Lab) は消化器外科医 3 名、遠隔術者 (市立釧路総合病院) は消化器外科医 3 名にて行った。力覚機能の設定は、①なし (x0)、②x0.5 倍、③等倍 x1.0 の 3 段階とし、術者には設定値を伏せて単盲試験として行った。小腸を 20cm ずつ両手の鉗子 (左手はフェネストレイト鉗子、右手はメリーランド鉗子) で把持し、落下させないように手繰る操作を行った。この操作は 3 つの力覚設定 (x0、x0.5、x1.0) をランダムに用いて実施し、合計 60cm の小腸を操作した。各設定における作業時間・把持力・鉗子移動距離、鉗子圧痕

数、漿膜損傷数につき測定し、検討を行った。通信回線は一般商用回線を使用し、セキュリティ対策として IPsec 暗号を付加した IP-VPN 回線を用いた。

・結果の概要：

左手の把持力において、力覚ありの設定で有意に把持力が弱かった ($x0$ vs $x0.5$: 4.13N vs 3.24N, $P=0.040$; $x0$ vs $x1.0$: 4.13N vs 2.26N, $P=0.019$)。一方、右手の把持力(N)、作業時間(秒)、鉗子移動距離 (cm)、鉗子圧痕数、漿膜損傷数には有意差は認められなかった。また、現地操作と遠隔操作の比較において、各力覚設定における作業時間、把持力、鉗子移動距離、鉗子圧痕数、漿膜損傷数に有意差は認められなかった。アンケート調査の結果では、全ての術者(被験者)が力覚の有無や各設定間の力覚の差を実感できなかったと回答した。

●結論および考察

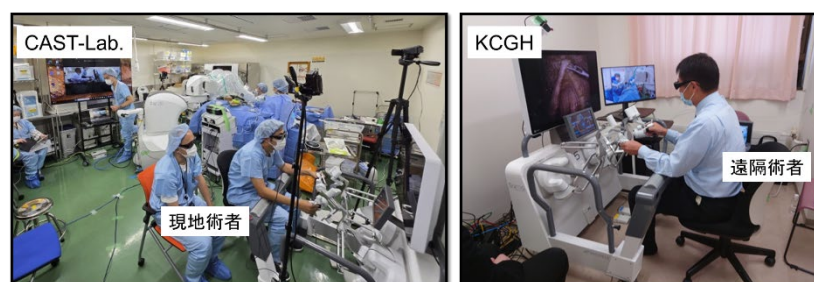
本カダバースタディーにより、消化器ロボット手術における力覚機能が愛護的臓器操作に有用であることが示された。また、遠隔操作時の力覚機能も現地操作と同様の効果を示すことが確認された。

これらの結果から、力覚機能は遠隔手術支援を含むロボット手術において、安全性向上に寄与する可能性が示唆された。

●図表

【図1：ダブルコックピットを用いた力覚機能の実証実験】

北海道大学臨床解剖実習室(CAST-Lab.)と回線距離にて約300km離れた遠隔地(市立釧路総合病院(KCGH))をNTT東日本(東京、日本)が提供する帯域保証型回線(G-1Gbps)にIPSec(Internet Protocol Security)による暗号化方式で接続した。CAST-Lab.にオペレーションユニット(OU)と現地術者用サージョンコックピット(SC)を配置。KCGHに遠隔術者用SCを配置し、実験を行った。



北海道大学臨床医解剖実習室(CAST-Lab.)、市立釧路総合病院(KCGH)

【図2：力覚機能における実証実験】

左側（釧路）：市立釧路総合病院の手術映像と操作風景。右側（札幌）：北海道大学臨床解剖実習室の手術映像と術野風景。



【表 1：力覚設定における実証実験結果】

左手の把持力において、力覚ありの設定で有意に把持力が弱かった（x0 vs x0.5: 4.13N vs 3.24N, $P=0.040$; x0 vs x1.0: 4.13N vs 2.26N, $P=0.019$ ）。一方、右手の把持力(N)、作業時間（秒）、鉗子移動距離（cm）、鉗子圧痕数、漿膜損傷数には有意差は認められなかった。

	x0（力覚なし）	x0.5	x1.0	P（x0 vs x0.5）	P（x0 vs x1.0）
作業時間（秒）	82.9	79.1	83.1	0.87	0.73
把持力(N)					
右手	2.99	2.90	2.63	0.38	0.06
左手	4.13	3.24	2.26	<u>0.04</u>	<u>0.019</u>
鉗子移動距離(cm)					
右手	82.5	79.3	82.9	0.89	0.98
左手	100.2	80.7	111.8	0.29	0.75
カメラ	0	0.72	0.73		
鉗子圧痕数	1	2	1		
漿膜損傷数	0.16	0	0.12		

【表 2：現地操作と遠隔操作における実証実験結果】

現地操作と遠隔操作の比較において、各力覚設定における作業時間、把持力、鉗子移動距離、鉗子圧痕数、漿膜損傷数に有意差は認められなかった。

	x0（力覚なし）			x0.5			x1		
	現地	遠隔	P	現地	遠隔	P	現地	遠隔	P
作業時間（秒）	66.8	99.0	0.36	50.6	107.5	0.18	65.0	87.1	0.24
把持力(N)									
右手	3.06	2.91	0.43	3.0	2.79	0.06	2.94	2.42	0.19
左手	4.16	4.10	0.65	3.41	3.06	0.65	2.79	1.91	0.59
鉗子移動距離(cm)									
右手	70.2	94.8	0.44	47.4	111.3	0.04	70.2	91.5	0.47
左手	106.3	94.1	0.70	87.1	74.2	0.66	153.1	84.3	0.58

●参考文献

- 1) Mori M, Hirano S, Hakamada K, et al.: Clinical practice guidelines for telesurgery 2022: Committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society. Surg Today, 54: 817-828, 2024.
- 2) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. Surg Endosc, 37: 6071-6078, 2023.
- 3) Ota M, Oki E, Nakanoko T, et al.: Field experiment of a telesurgery system using a surgical robot with haptic feedback. Surg Today, 54: 375-381, 2024.
- 4) 日本内視鏡外科学会ガイドライン委員会（編）. 2023 年版 技術認定取得者のための内視鏡外科診療ガイドライン. 日本内視鏡外科学会, 2023. Available from: <https://minds.jcqh.or.jp/summary/c00853/>

●研究内容掲載論文

- ・ Takano H, Ebihara Y, Hirano S, et al.: Effectiveness of haptic feedback during local and remote robotic surgery: single-blind cadaveric study. J Robot Surg, 19: 662, 2025.

実証研究 19 遠隔手術の社会実装に向けた追従アノテーションの安全性に関する 実証研究

●研究目的

- 腹腔鏡手術における遠隔手術指導を行うために開発したリアルタイム追従型アノテーションシステムの機能と安全性を検討する。

●研究により明らかになったこと

- OpenCV のモジュールの一つである MedianFlow をもとに、スコープの移動の推定を行うことが可能になった。Forward-Backward エラーチェックと NCC チェックで比較的精度の高いポイントのみを残すことで、鉗子などの器具が術野内へ入り込んで、背景となる臓器の追従を行うシステム構築が可能となった。
- リアルタイム追従型アノテーションシステムでは指導者がアノテーションを記載する際に、動画が一時停止する必要がある、タブレットにスタイラスペンを近接した際に自動的に画面が停止する機能があることで、スムーズなアノテーションが可能となった。
- 一般商用回線を利用して動画の送受信を行い、遅延時間は 0.6 秒程度であったが、スムーズな手術の実施に支障を認めなかった。

●研究環境

- 研究期間：2024 年 10 月 22 日、2024 年 11 月 19 日
- 研究施設：九州大学病院－九州大学病院別府病院
- 使用回線：九州大学病院－九州大学病院別府病院間専用回線(上り下りで 200～800Mbps)(2024 年 10 月 22 日)、ドコモ・au・ソフトバンク各社の商用回線(2024 年 11 月 19 日)
- 遠隔手術器材：A440 社によるリアルタイム追従型アノテーションシステム(液晶タブレット、スタイラスペン)
- 操作対象：実臨床手術中の画面書き込み
- 操作者：手術指導者(消化器外科医師)
- 操作内容：胃癌に対する腹腔鏡下幽門側胃切除術および胆嚢腺筋腫症に対する腹腔鏡下胆嚢摘出術の手術中の手術指導を目的としたアノテーションの書き込み

●研究の背景と目的

遠隔手術指導を行うにあたり、音声での指導に加え、アノテーションを行うことで視覚情報を付与することができる。これまでに、遠隔手術指導は、実地手術指導と遜色ない手術成績をもたらすことができることが報告されている¹⁾が、遠隔手術指導におけるアノテーションではタイムラグにより指導者、術者のストレスになることがある。これまでに、ロボット手術における 3D アノテーションが手術教育に有用であることを示した²⁾が、地域医療を担う病院の中には手術支援ロボットが導入されていない施設も少なくない。腹腔鏡手術では

3D アノテーションシステムの実現は難しく、遠隔手術指導において有用なリアルタイム追従型アノテーションシステムを開発することを目的とした。

●検討方法と結果の概要

1) リアルタイム追従型アノテーションシステムの開発

WebAR や AR アプリケーションの開発実績のある A440 Inc.と協力し、リアルタイム追従型アノテーションシステムを開発した。このシステムでは、指導者が手術動画上にアノテーションを書き込む際に、タブレットにペン先が触れている時間のみ指導者側のタブレットの動画が停止し、円滑な書き込みが行える。さらに、一度記載したアノテーションは、動画画面全体の縮小・拡大・水平移動に応じて追従するため、手術の場面が変化してもアノテーションの矢印や円が実際の手術視野と乖離しない。

本システムにおける追従は、画像解析のためのライブラリである OpenCV の外部モジュールの、物体追跡アルゴリズムの一つである MedianFlow を元にアルゴリズムを作成している。オブジェクトの移動方向と移動量を推定するアルゴリズムを応用し、手術映像に適用した。通常は画面内の特定のオブジェクトに対して行い、対象オブジェクトの動きを推定するためのアルゴリズムだが、本システムではオブジェクトではなく全画面に対して処理を行うことで、スコープの移動の推定を行っている(図 1)。

Lucas-Kanade 法により 1 つ前の動画画像から最新の動画画像へのポイントのオプティカルフローを検出する。さらに、Forward-Backward エラーチェックと NCC チェックで比較的精度の高いポイントのみを残すことで、鉗子などの器具が術野内へ入り込んでも、範囲の大部分へ入り込まない限り、背景となる臓器の追従を行うシステム構築が可能となった。全ての計測前ポイント間の距離と、それに対応する、全ての計測後ポイント間の距離の相対的な変化を計算し、結果の中央値をカメラの前後移動と考え、スケールデータを更新する(スコープの前後移動に対応)。計測前ポイントと計測後ポイントの位置の変化量を計算し、その中央値をカメラの上下左右の移動と考え、位置データに反映する(スコープの上下左右移動に対応) (特願 2024-035539)。

2) リアルタイム追従型アノテーションシステムの実用性、安全性の検討

リアルタイム追従型アノテーションシステムの実用性、安全性を検討するために九州大学病院と九州大学病院別府病院間で実臨床における胃癌手術(腹腔鏡下幽門側胃切除術)および胆嚢腺筋腫症に対する手術(腹腔鏡下胆嚢摘出術)の際に、遠隔手術指導を行った(倫理審査許可番号: 24133-00)。1 回目は病院間の専用回線、2 回目は商用回線を用いて通信したが、いずれも手術動画がアノテーションを反映された状態で別府病院に表示されるまでの誤差は 0.6 秒であった。1 回目の遠隔手術指導の際は、10 分ごとに時間を区切り、「追従あり」「追従なし」の切り替えを行った。追従なしの状態では、指導者の意図した場所と別の場所にアノテーションされてしまうことがあった(図 2)が、追従ありの状態では指導者の意図したアノテーションが実行できていた(図 3)。そこで、手術ビデオの振り返りを行い総アノテーション回数における、有効アノテーション回数を計測した(表 1)。その結果、追従ありの状態では追従なしの状態と比較して、有効なアノテーションを実行できている割合が高かった($p=0.0096$ 、図 4)。2 例目につ

いては追従ありのまま手術を完遂した。2例とも術中合併症なく、安全に手術可能であった。

●結論および考察

アノテーションが術野の動きに伴って追従する「リアルタイム追従型アノテーションシステム」を開発した。このアノテーションシステムでは、術者が手術を止めることなく、指導者が有効にアノテーションを記載することができるメリットがある。また、追従するため多少タイムラグがあったとしても、従来のアノテーションシステムと比較して有効なアノテーションを記載できる可能性が期待される。特に、リアルタイム追従がない状態では拡大視野で細かいアノテーションを行う場合に不利となる印象であった。

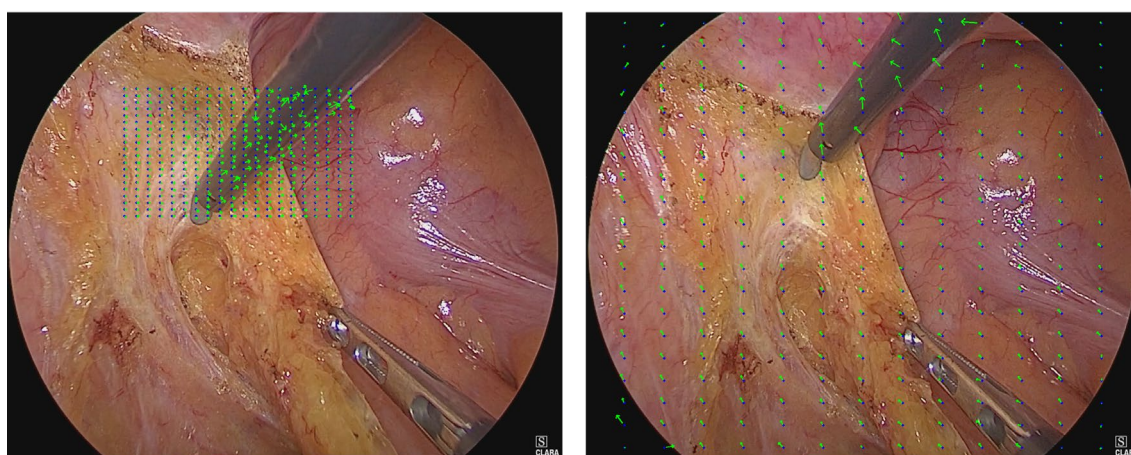
今回の検討では、安全性の検討が主目的であったため、遠隔で手術を行う術者も日本内視鏡外科学会技術認定医であった。今後は外科レジデントへの手術指導、また、タイムラグが延長することが予想される国外との通信における手術指導を行うことを検討している。

●図表

【表1：リアルタイム追従型アノテーションの有効性】

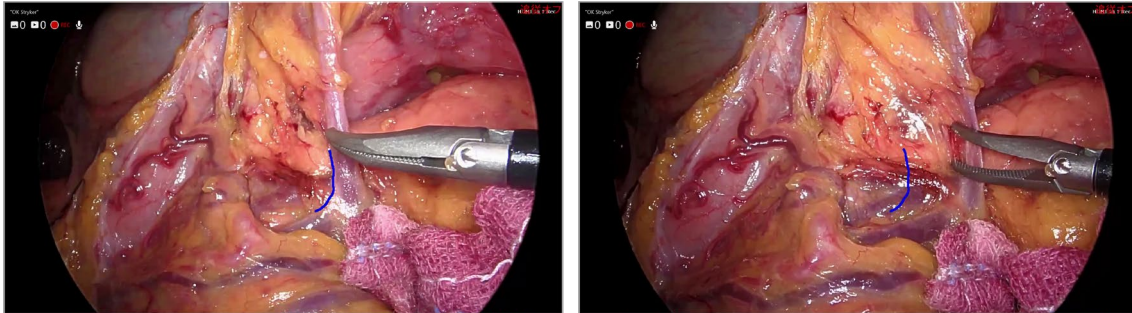
追従あり	ピリオド1	ピリオド2	ピリオド3	ピリオド4	ピリオド5
有効アノテーション回数	17	22	10	20	19
総アノテーション回数	21	23	14	23	22
有効率	81.0%	95.7%	71.4%	87.0%	86.4%
追従なし	ピリオド1	ピリオド2	ピリオド3	ピリオド4	ピリオド5
有効アノテーション回数	13	9	9	6	13
総アノテーション回数	17	17	14	10	36
有効率	76.5%	52.9%	64.3%	60.0%	36.1%

【図1：術野の移動を推定するためのアルゴリズム】



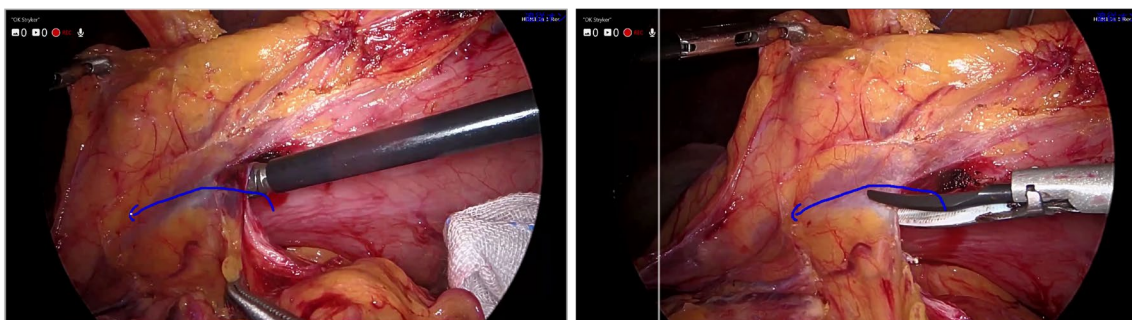
物体追跡アルゴリズムの一つである MedianFlow を使用し、対象オブジェクトだけ(左)でなく全画面に対して処理を行う(右)ことで、スコープの移動の推定を行なっている。

【図2：従来型アノテーション】



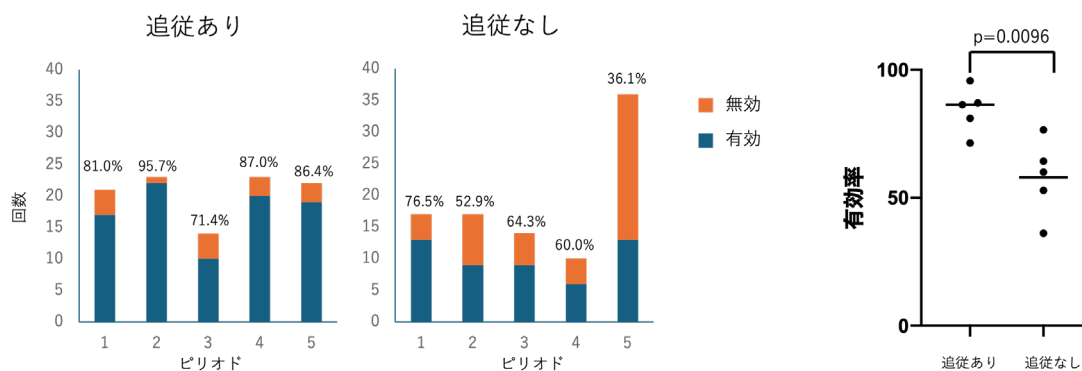
従来型アノテーションシステムでは、指導者が記載したアノテーションは固定されるため、術野が移動すると指導者の意図しない場所に反映される。

【図3：リアルタイム追従型アノテーション】



リアルタイム追従型アノテーションシステムでは、指導者が記載したアノテーションが術野の変化に伴って移動・拡大/縮小する。

【図4：リアルタイム追従型アノテーションの有効性】



追従ありの状態では、追従なしの状態と比較して、有効なアノテーションを記載できている割合が高かった。

●参考文献

- 1) Bilgic E, Turkdogan S, Watanabe Y, et al.: Effectiveness of Telementoring in Surgery Compared With On-site Mentoring: A Systematic Review. Surg Innov, 24: 379-385, 2017.

- 2) Nakanoko T, Oki E, Ota M, et al.: Real-time telementoring with 3D drawing annotation in robotic surgery. Surg Endosc, 7: 9676-9683, 2023.

●研究内容掲載論文
論文作成中

実証研究 20 通信ネットワークを利用した 2 施設間での遠隔ロボット手術システムへのセキュリティ対策製品の適用と監視等に係る実証

●研究目的

- セキュリティ機器による通信への影響の有無を確認する
 - セキュリティ機器がどのような通信を検知もしくは検知しないかを評価する
 - セキュリティ機器を介在させた際の通信遅延を評価する

●研究により明らかになったこと

- セキュリティ機器を介在させても遠隔手術への影響がない
- セキュリティ機器が疑似攻撃を検知するものの、手術支援ロボット操作に必要な通信はサイバー攻撃として誤検知しない
- セキュリティ機器の通信遅延が最大 2ms であった

●研究環境

- 研究期間：2025 年 2 月 1 日～ 2 日
- 研究施設：弘前大学医学部附属病院 — つがる総合病院
- 使用回線：NTT 東日本 ギャランティー型回線（帯域保証速度 100Mbps）、ベストエフォート型回線（最大速度 1Gbps）、IOWN APN（帯域保証速度 100Gbps） ※院内 LAN の最大速度は 1Gbps
- 遠隔手術器材：セキュリティ機器（IPS）、メディカロイド社製ロボット hinotori™（エンコーダ・デコーダ含む）
- 操作対象：人工臓器モデル（膵腸吻合モデル）
- 操作者： 現地術者の修練医 4 人、遠隔指導術者の専門医 4 人
- 操作内容：人工臓器モデルを用いた模擬遠隔ロボット手術

●研究の背景と目的

遠隔手術を安全に行うために特に考えるべきことは、出血や患者の急変に備えた緊急時対応、通信遮断時に備えた通信回線の安全性、不正アクセス対策を含めた情報通信の安全性がある。患者の急変への備えに関しては通常の手術環境での緊急時対応に準じた緊急ロールアウトや腹腔鏡や開腹手術へのコンバートに備えた準備をしておく必要がある。

通信遮断に関しては副回線を用いた対応により安全性が担保されとの報告がある¹⁾。

不正アクセス対策を含めた情報通信の安全性や対策に関しては、IP-VPN に IPsec 暗号化を追加しても通信に大きな影響がないとする報告がある²⁾。しかし、通信への妨害や攻撃に対する安全性への対策の報告はなく、遠隔手術時の通信システムにセキュリティ機器を介在することによる遠隔ロボット手術への影響は検討されていない。

この研究の目的は、通信ネットワークを利用した 2 施設間の通信回線において、セキュリティ機器を介在させることによる遠隔ロボット手術への影響について検証することである。

●検討方法と結果の概要

約 30km 離れた弘前市の弘前大学医学部附属病院と五所川原市のつがる総合病院間の遠隔手術環境上にシステムを構築した（図 1）。本環境で回線の切り替えおよび映像情報の圧縮率を変更し、複数回模擬手術を実施した。なお、セキュリティ機器はインライン接続およびミラーポートへの接続の両方が利用できる Intrusion Prevention System（IPS）を使用した。また、手術支援ロボットの施設間通信に必要なエンコーダ／デコーダ処理時間は 25ms と設定した。

1) セキュリティ機器が検知する通信

遠隔手術における手術支援ロボットによる通信は異常な通信として検知せず、手術に影響を与えないことが判明した。また、ポートスキャンによる疑似攻撃を遠隔手術中に実施したところ、異常な通信として検知できることが分かった。

以上のことから手術に影響を与えずに遠隔手術環境のセキュリティレベルを向上できるといえる。

2) 通信遅延

使用回線ごとの通信速度に関して、セキュリティ機器をインライン接続、またはミラーポートへ接続する前後で計測し、その差分をセキュリティ機器における通信遅延とした。測定の結果、最大 2ms であることが分かった。また、エラーパケットは、ギャランティー型回線において、セキュリティ機器を介在させないときは TCP 通信で 0.02% から 0.04% であったが、セキュリティ機器を介在させたときは、0.00% から 0.04% であった。

以上の結果から、セキュリティ機器の有無によってエラーパケットに変化は見られなかった。

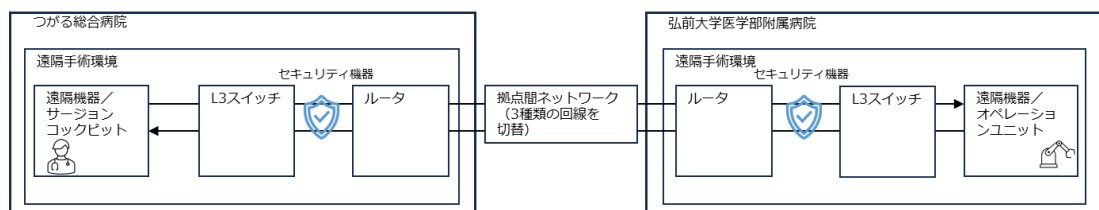
●結論および考察

今回の実証研究では、セキュリティ機器の設置は遠隔手術への影響はないことが明らかになった。

セキュリティ機器設置の留意点として、実証研究では手術支援ロボットの通信を検知できたが、実際の環境で利用する際は事前にセキュリティ機器の動作を確認する必要がある。

●図表

【図 1：評価実証環境】



●参考文献

- 1) Wakasa Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: Ensuring communication redundancy and

establishing a telementoring system for robotic telesurgery using multiple communication lines. *J Robot Surg*, 18: 9, 2024.

- 2) Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al.: Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations. *Surg Endosc*, 37: 6071-6078, 2023.

●研究内容掲載論文

- Morohashi H, Hakamada K, Wakasa Y, et al.: Impact of Data Compression and Security Devices on Telesurgery Systems. *Surg Today*, 2025. (Online ahead of print)
- Wakasa Y, Hakamada K, Morohashi H, et al.: The Feasibility and Safety of Telerobotic Pancreaticojejunostomy Using a Surgical Robot: A Pilot Study with Commercial Optical Networks, *Asian J Endosc Surg*, 2025. (Accepted)