遠隔手術ガイドライン

一般社団法人日本外科学会 遠隔手術実施推進委員会 編

2022 年 6 月 22 日 公開版

はじめに

本邦では 2012 年に米国製の手術支援ロボットによる前立腺癌に対する手術が初めて保険適応となり、その後、各領域に適応が拡大されてきた。現在では全国の病院に 400 台以上の手術支援ロボットが導入されている。2020 年には国産の手術支援ロボットも製造販売承認され、ロボット支援手術はますます一般化していくことが予想される。

手術支援ロボットはその構造上、情報通信機器を用いることで術者が遠隔地にいる患者に対しリアルタイムに手術操作を行うことが可能である。過去には日本を含めた各国で遠隔手術の臨床研究が行われてきた。また、令和元年度の「オンライン診療の適切な実施に関する指針（以下、オンライン診療指針）」改定を受け、オンライン診療の一部として、手術を行う現場に医師がいる場合の遠隔手術（オンライン手術）が含まれたことで医師法との関係性が定義され、本邦での実施が可能となった。しかしながら、遠隔手術を実際に行うための安全性の確保や倫理上の問題点、必要な情報通信システムなどは関係学会による臨床研究等で整理が進むことが期待されており、「オンライン診療指針」では明確にされていない。

遠隔手術は、オンライン診療の基本理念である医療の質の向上、質の高い医療へのアクセシビリティの確保、治療への患者の能動的関与による治療効果の最大化に合致している。人口減少、外科医師数の減少などの社会課題の中で、遠隔手術は質の高い医療の均てん化に寄与し、地域医療支援と若手外科医教育にも貢献し得る診療形態である。加えて、医療水準の向上による公共の福祉への寄与のみならず、我が国における関連分野の技術開発を促進する効果も期待される。

したがって、本ガイドライン作成の目的は手術支援ロボットを用いた遠隔手術を将来にわたって適切に行うため、実施施設やスタッフの要件、必要な情報通信システム、倫理面での確認事項などを整理し、提供・実施体制の基準を示すことである。また同時に、近年、開発が進められている遠隔地から情報通信機器を用いて音声や図示で行う手術指導についても遠隔手術の一型として定義し、その実施にかかる基本的事項を解説する。

なお、本ガイドラインは、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」において令和 2 年度に一般社団法人日本外科学会が受託した「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」の成果物として策定された。

本ガイドラインは、遠隔手術の使用実態や手術支援ロボットあるいは情報通信技術の向上等を踏まえ、適宜見直しを行うこととする。

作成委員

森　　正樹（一般社団法人 日本外科学会、東海大学医学部）
平野　　聡（北海道大学　消化器外科 II）
袴田　健一（弘前大学　消化器外科学）
沖　　英次（九州大学　消化器・総合外科）
漆谷　重雄（国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系）
宇山　一朗（藤田医科大学 先端ロボット・内視鏡手術学）
江藤　正俊（九州大学　泌尿器科学）
海老原裕磨（北海道大学　消化器外科 II）
川嶋　健嗣（東京大学大学院 情報理工学系研究科）
菅野　貴皓（リバーフィールド株式会社）
喜連川　優（国立情報学研究所、東京大学）
絹笠　祐介（東京医科歯科大学　消化管外科学）
小林順二郎（国立研究開発法人 国立循環器病研究センター）
中村　廣繁（鳥取大学　器官制御外科学）
能城　浩和（佐賀大学　一般・消化器外科学）
万代　昌紀（京都大学　婦人科学産科学）
諸橋　　一（弘前大学　消化器外科学）

助言

山本　隆一（一般財団法人 医療情報システム開発センター）
落合　孝文（渥美坂井法律事務所）
梶谷　　篤（梶谷綜合法律事務所）
津川　友介（カリフォルニア大学ロサンゼルス校）

監修

池田　徳彦（一般社団法人 日本外科学会）
坂井　義治（日本内視鏡外科学会、大阪赤十字病院）
三森　功士（九州大学病院別府病院　外科）
渡邊　　剛（日本ロボット外科学会、ニューハート・ワタナベ国際病院）

協力

遠藤　　晃（北海道大学病院 医療情報企画部）
工藤　孔梨子（九州大学 アジア遠隔医療開発センター）

利益相反

利益相反の扱いに関しては、日本外科学会の「外科臨床研究の利益相反に関する指針」（2019 年 1 月 29 日改正版）に従い、作成委員、助言者、監修者、協力者全員から、対象期間（2021 年 4 月 1 日～2022 年 3 月 31 日）における特定企業との経済的な関係につき利益相反状況の申告を得た。

申告者と企業名および申告事項を以下に示す。

宇山　一朗	株式会社メディカロイド	講演料等、寄付講座所属
菅野　貴皓	リバーフィールド株式会社	役員
川嶋　健嗣	リバーフィールド株式会社	株保有
絹笠　祐介	リバーフィールド株式会社	講演料等
坂井　義治	株式会社メディカロイド	講演料等

全ての事項に該当がない対象者を以下に示す。

・作成委員：森 正樹、平野 聡、袴田 健一、沖 英次、漆谷 重雄、江藤 正俊、海老原 裕磨、喜連川 優、小林 順二郎、中村 廣繁、能城 浩和、万代 昌紀、諸橋 一
・助言者：山本 隆一、落合 孝文、梶谷 篤、津川 友介
・監修者：池田 徳彦、三森 功士、渡邊 剛
・協力者：遠藤 晃、工藤 孔梨子

本ガイドラインの構成

I. 総論

1. 目的
2. 遠隔手術の種類と本ガイドラインの適用範囲
3. 用語の定義
4. ガイドラインの使用法

II. 各論 1 ：遠隔手術支援（Telesurgical support）

１．遠隔手術支援の提供体制
　（１）遠隔手術支援を行う医療チームの要件
　（２）遠隔手術支援を行う医療機関の要件
　（３）遠隔手術支援を行うための通信環境（ネットワーク環境）の要件
　（４）遠隔手術支援に使用する手術支援ロボットおよびデバイスの要件
　（５）遠隔手術支援に必要な情報セキュリティ管理体制
　（６）遠隔手術支援に必要なセキュリティ対策
２．遠隔手術支援の実施体制
　（１）遠隔手術支援実施に関する施設における手続き
　（２）遠隔手術支援を実施可能な術式
　（３）遠隔手術支援の準備
　（４）遠隔手術支援中の安全確保
　（５）遠隔手術支援中の有害事象発生時の対応
　（６）遠隔手術支援術中の術式変更
３．遠隔手術支援における責任の按分
４．遠隔手術支援における患者と医師の関係
５．遠隔手術支援における費用負担

III. 各論 2：遠隔手術指導（Telementoring）

１．遠隔手術指導の提供体制
　（１）遠隔手術指導を行うための通信環境（ネットワーク環境）の要件
　（２）遠隔手術支援に必要な情報セキュリティ対策
２．遠隔手術指導の実施体制
　（１）遠隔手術指導を実施可能な術式
　（２）遠隔手術指導の準備

（3）遠隔手術指導中の有害事象発生時の対応
3．遠隔手術指導における責任の按分
4．遠隔手術指導における患者と医師の関係
IV. 各論 3：完全遠隔手術（Full telesurgery）
V. 参考資料

I. 総論

１．目的

「遠隔手術ガイドライン（以下、本ガイドライン)」は、指導的立場の医師が情報通信技術を用いて異なる医療機関で行われる手術に対して支援や指導を行う際の提供体制や実施体制について適切な基準を示すことを目的とする。

２．遠隔手術の種類と本ガイドラインの適応範囲

（１）遠隔手術の種類

本ガイドラインでは、遠隔手術を以下の３種類に分類する。

①遠隔手術指導（Telementoring）

遠隔地の医療機関において指導医が患者の存在する現地の手術にリアルタイムで参加しつつ、タブレット等の情報通信機器を用いて画像や音声で具体的に現地術者の手術内容を指導する形態である。遠隔地の指導医と現地の術者の関係は「オンライン診療指針」における D to D となる。遠隔操作により現地のモニターに線や矢印を投影するシステムを用いることや、現地の手術室全体を見渡せるシステムで手術全体を統括することも含まれる。

②遠隔手術支援（Telesurgical support）

遠隔地において指導医が手術支援ロボットを用いて現地の手術に助手あるいは部分的に術者として手術を支援し、現地術者と共同で手術を行う形態である。遠隔地の指導医と現地の術者および患者の関係は「オンライン診療指針」における D to P with D となる。通信環境不良などの不測の事態が生じた際にも現地医療機関で手術が完遂できる能力が必要である。

③完全遠隔手術（Full telesurgery）

現地医療機関に手術を実施する外科医が不在の環境下で、遠隔地の医師が手術支援ロボットを用いて手術操作を行うものである。遠隔地術者と患者の関係は「オンライン診療指針」における D to P となり、一般オンライン診療としては実施可能であるが、遠隔手術としての実施は認められていない。

遠隔手術の種類とそれぞれの比較

手術の概要		①遠隔手術指導（Telementoring）	②遠隔手術支援（Telesurgical support）	③完全遠隔手術（Full telesurgery）
遠隔手術	内容	遠隔地の指導医がタブレット等の情報通信機器を用いて遠隔から口頭や図示で行うこと	遠隔地の指導医が現地医師チームの手術を遠隔操作で直接支援すること	現地に手術を行う外科医不在の環境下で遠隔地の医師が遠隔操作で手術を行うこと
	操作者	現地医師(100%)	現地医師と遠隔医師（操作権限の交代による共同手術）	遠隔医師(100%)
	手術責任者	現地医師	現地医師	遠隔医師
	責任按分の事前協議と記録	必要	必要	—
	緊急対応	現地医師チーム	現地医師チーム	現地の医師・スタッフ等
オンライン診療指針*	指針上の診療形態	D to D	D to P with D	D to P
	指針の適用範囲	適用外	適用	適用
実施の可否		可能	可能	不可
本ガイドライン		適用	適用	適用

D: Doctor, P: Patient

*：オンライン診療の適切な実施に関する指針

（2）本ガイドラインの適用範囲

本ガイドラインは、「オンライン診療指針」により学会などに対しガイドラインなどの作成が求められている②遠隔手術支援（Telesurgical support）を対象とするとともに、「オンライン診療指針」には含まれないが、今後、普及が進むと予想され、実施にあたり一定の基準が求められる①遠隔手術指導（Telementoring）についても対象に含める。

なお、③完全遠隔手術（Full telesurgery）も本ガイドラインに含めるが、手術実施お

よび患者管理における安全性確保の観点から、あるいは法的な観点からも現時点では実施が困難である。

3. 用語の定義

本ガイドラインにおける用語は以下のように定義する。

1）**手術支援ロボット（surgical robot）**：国内で「手術用ロボット手術ユニット」として認可を受けている手術支援システム。診療報酬上は「内視鏡手術用支援機器」と表記される。

2）**ロボット支援下（内視鏡）手術（robot-assisted [endoscopic] surgery）**：手術支援ロボットを使用して行う内鏡視手術。診療報酬上は「内視鏡手術用支援機器を用いる手術」と表記される。

3）**遠隔手術（Telesurgery/ Telesurgical support/ Telementoring）**：異なる医療提供施設（以下、施設）間において、指導医が情報通信技術を用いて手術の支援や指導を行うこと。

4）**現地施設（local hospital [institution]）**：遠隔手術が実施される患者が存在する施設。

5）**現地術者（local surgeon）**：遠隔手術が実施される患者が存在する施設において手術操作を実施する医師。

6）**現地手術スタッフ（local operative staff）**：遠隔手術を実施される患者が存在する施設において、遠隔手術に関わる術者以外の人員（医師、麻酔科医、臨床工学技士、看護師、医療情報管理者など）。

7）**遠隔施設（remote hospital [institution]）**：指導的立場の医師が在籍し、遠隔手術を実施される患者に対し情報通信技術を用いて手術の支援や画像・音声などによる指導を行う施設。

8）**遠隔術者（remote surgeon）**：遠隔施設において指導的立場で手術支援ロボットを操作することで現地施設における術者を技術的に支援する医師。

9）**遠隔指導者（remote mentor）**：遠隔施設において画像や音声を用いた指導のみを行い、手術操作は行わない医師。

10）**遠隔手術スタッフ（remote operative staff）**：遠隔術者や遠隔指導者が存在する施設において、遠隔手術にかかわる術者以外の人員（医師、臨床工学技士、看護師、医療情報管理者など）。

11）**施設管理者（administrator/ director of hospital [institute]）**：遠隔手術を実施する現地施設および遠隔施設において、遠隔手術を含む診療全般に対して管理義務を有する施設（病院）長など。

４．本ガイドラインの使用法

本ガイドラインは臨床現場において遠隔手術を実践する際のガイドとして利用することができる。本ガイドラインは診療科および臓器横断的な内容を示すものであり、各種疾患に対する遠隔手術の適応や術式などの具体的方法については、該当疾患を専門とする関係学会の定めるガイドラインを遵守することを求める。

II. 各論１：遠隔手術支援（Telesurgical support）

１．遠隔手術支援の提供体制

（１）遠隔手術支援を行う医療チームの要件

１）遠隔手術支援に関わる術者の要件

① 遠隔術者

遠隔術者は現地術者を支援して遠隔手術を安全に遂行するための十分な技術を有している必要がある。このため、遠隔術者は日本内視鏡外科学会、日本ロボット外科学会などの関連学会（以下、関連学会）が認定（推奨）するロボット支援下内視鏡手術のプロクターであることを必須とする。

また、遠隔術者は日本外科学会もしくは関連学会が指定する遠隔手術に関するトレーニングプログラムを受講済みでなければならない。

② 現地術者

現地術者は手術の主たる執刀者となるため、使用する手術支援ロボットの製造販売元が提供するトレーニングプログラムを受講し、関連学会よりロボット支援下内視鏡手術の certificate を取得していることを必須とする。

現地術者は、予定手術の執刀経験を有するか、もしくは関連学会が認定するプロクターによる直接指導を１回以上受けていることを必須とする。

現地術者は、各領域の専門医相当の手術経験を有していることが望ましい。

２）遠隔手術支援に関わる手術スタッフの要件

① 看護師

現地施設の手術には、使用する手術支援ロボット製造販売元のトレーニングプログラムを受講しているか、それと同等以上の知識を有する看護師が直接介助者として参加することが望ましい。一方、遠隔施設には看護師の配置は必須ではない。

② 臨床工学技士

現地施設および遠隔施設には、使用する手術支援ロボットの保守管理の経験がある臨床工学技士が配置されている必要がある。当該臨床工学技士は手術支援ロボットに発生した通信環境以外の問題に対して、適切な助言やトラブルシューティングを行うことが求められる。現地施設および遠隔施設には、使用する手術支援ロボット製造販売元のトレーニングプログラムを受講しているか、それと同等以上の知識を有し、同手術支援ロボットの保守管理の経験がある臨床工学技士が配置されている必要がある。当該臨床工学技士は、手術支援ロボットに発生した通信環境以外の問題に対して適切な助言やトラブルシューティングを行うことが

求められる。なお、臨床工学技士が清潔補助者として参加する場合も同様の知識等を有する必要がある。

（2）遠隔手術支援を行う医療機関の要件

1）遠隔手術支援を行う現地施設および遠隔施設に求められる要件

① 現地施設および遠隔施設は医療法に定める医療安全管理体制が整備されていなければならない。

② 現地施設および遠隔施設は、遠隔手術支援に必要な通信環境が整備されていなければならない。((3)「遠隔手術支援を行うための通信環境（ネットワーク環境）の要件」を参照)

③ 現地施設および遠隔施設は、遠隔術者が現地施設の手術環境を映像で確認し、音声で相方向的にコミュニケーションが可能な通信環境（Web 会議システム等）を準備することが必須である。当該通信環境は、遠隔手術システムで使用する通信回線の影響を受けない別系統の回線を使用しなければならない。

④ 現地施設および遠隔施設は、施設における通信環境等の情報基盤の保守管理を行う部署（医療情報部等）を有することが必須である。同部署は、遠隔手術支援における通信環境に精通し、遠隔手術支援の実施において施設間で連携し、通信環境の保全に努めなければならない。

2）遠隔手術支援を受ける現地施設の要件

① 現地施設は、診療報酬上のロボット支援下手術の施設基準を 1 手術術式以上で満たし、地方厚生局にその届け出を行っていなければならない。ただし、遠隔手術支援を予定する術式が届け出た術式に含まれる必要はない。

② 現地施設は、遠隔手術支援を予定するロボット支援下手術を過去に 1 例以上、自施設で実施した経験を有していなければならない。当該手術経験は関連学会のプロクター制度やそれに準ずる制度を利用したものでも認められる。

③ 現地施設は、遠隔手術支援が続行困難となった場合に備え、支援を予定するロボット支援下手術を内視鏡下、開腹・開胸下などの代替アプローチで完遂が可能な設備およびスタッフを擁する必要がある。

（3）遠隔手術支援を行うための通信環境（ネットワーク環境）の要件

1） 遠隔手術支援を行う通信環境として、使用する手術支援ロボットの安定稼働に必要な通信帯域を確保することが必須である。回線としては、必要帯域が確保される帯域保証型または帯域確保型の利用が望ましい。利用可能帯域が変動する通信回線（ベストエフォート型回線等）を利用する場合には、その通信帯域が使用する手術支援ロボットの操作に必要な帯域を安定して上回ることを事前に確認する必要がある。なお、その必要帯域は手術支援ロボットの機種や映像圧縮方式等に応じて異な

ることに留意する。

2) 通信回線に重大な遅延、遅延揺らぎ、パケットロスが生じないことを事前に確認する必要がある。なお、いわゆるベストエフォート型回線は遅延揺らぎ、パケットロスが時々刻々と変わり得ることから、手術時の通信環境が事前確認時の環境とは大きく異なる場合があることに留意する。

3) 遠隔手術環境で新たに発生する往復通信遅延時間と*情報処理遅延時間の総和は、最大時でも 100 ミリ秒以下が望ましい。

*：情報処理遅延時間：遠隔地間で情報を送信および受信するために情報を変更処理するための所要時間

4) 後述の「(6) 遠隔手術支援に必要なセキュリティ対策」に示す内容を実施し得る通信回線でなければならない。

5) 通信環境の不具合（通信回線切断、通信網の輻輳等）が発生する場合に備え、通信回線の冗長化構成によって不具合時のリスク低減を図ることが望ましい。通信回線の冗長化には、通信回線種類の冗長化の他、通信キャリアの冗長化などが含まれる。その場合、回線切断時、回線切り替え時、回線切り戻し時に手術操作および手術支援ロボットの稼働に影響がないことを事前に確認する必要がある。

（4）遠隔手術支援に使用する手術支援ロボットおよびデバイスの要件

1) 使用する手術支援ロボットは、「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」等の法令により、高度管理医療機器（クラス III）の医療機器承認を受けていなければならない。

2) 手術支援ロボットは、遠隔手術での使用が認められていなければならない。

3) 手術支援ロボットは、安定稼働に必要な通信帯域が公示されていることが必須である。必要帯域が変動する場合にはその範囲が示されている必要がある。

4) 手術支援ロボットは、通信瞬断、通信遅延やパケットロスを前提とした仕様である必要がある。すなわち、通信の瞬断、遅延、パケットロスやパケットの順序逆転などが発生した場合、制御機器の停止や誤作動を軽減する機能を有する必要がある。

5) 手術支援ロボットに直接装着して使用するデバイスは、当該ロボットの製造販売元が推奨するものを用いなければならない。

6) 術者が操作を行う手術支援ロボットのコンソール（コックピット）は、現地術者と遠隔術者の操作権限の変更機能を有し、同時に変更履歴を記録する機能を有する必要がある。

（5）遠隔手術支援に必要な情報セキュリティ管理体制

現地施設および遠隔施設の術者、手術スタッフ、施設管理者、手術支援ロボット製造販売元ならびに通信事業者は、遠隔手術支援の可用性を確保することを前提に、そ

れぞれ最新版の「オンライン診療指針」、「医療情報システムの安全管理に関するガイドライン」ならびに「医療情報を取り扱う情報システム・サービスの提供事業者における安全管理ガイドライン」の各最新版に沿って情報セキュリティ対策を講じる必要がある。

1) 現地施設および遠隔施設の術者と施設管理者は、国が定めるオンライン診療研修の受講が必須である。また、現地手術スタッフおよび遠隔手術スタッフにおいても「オンライン診療指針」の内容を十分に理解しておくことが望ましい。
2) 現地施設および遠隔施設の術者、手術スタッフ、施設管理者は、「オンライン診療指針」ならびに「医療情報システムの安全管理に関するガイドライン」に沿って、それぞれが独立して自施設の情報セキュリティ対策を行う必要がある。
3) 遠隔手術環境を提供する手術支援ロボット製造販売元、通信事業者は「医療情報を取り扱う情報システム・サービスの提供事業者における安全管理ガイドライン」に基づいて、現地施設および遠隔施設と協調して遠隔手術支援が安全に実施可能な体制を構築する必要がある。
4) 遠隔手術の実施に際して、現地術者および現地施設管理者と、遠隔術者および遠隔施設管理者との間で締結される契約書もしくは合意書には、後述の「（6）遠隔手術支援に必要なセキュリティ対策」に含まれる情報セキュリティ管理体制に関する記載が必要である。

（6）遠隔手術支援に必要なセキュリティ対策

遠隔手術支援の可用性を確保した上で、情報セキュリティの完全性と機密性を確保する必要がある。具体的には、遠隔手術環境を構成する要素について、現地施設および遠隔施設がそれぞれ設備上の対策、技術的対策、指示・責任体制等の組織的対策、教育・訓練を含む人的対策を講じる必要がある。

1) 通信回線のセキュリティ対策
   ① 以下に示すセキュリティ対策をとりうる通信回線であることが必須である。
   - 物理的または論理的にインターネットから分離された閉域通信ネットワーク（仮想専用回線（Layer-3/Layer-2 VPN））が望ましい。やむを得ず一部にオープンな回線を使用する場合、もしくは手術支援ロボットの保守管理の目的でインターネット VPN 回線を使用する場合には、IPSec+IKE（version 2）接続等の安全性の高い方式が推奨される。同時にファイアウォール等により宛先／送信元 IP アドレスや使用ポート番号を可能な限り限定する必要がある。
   - 通信端末間での暗号化処理を必須とする。ロボットの保守管理等の目的で外部回線と接続する場合にも同様とする。

   ② 外部からリモートで手術支援ロボットの保守を行う場合、保守管理業務の内容に応じてアクセス方法および権限管理等のセキュリティ遵守事項について、保守業

務の受託企業が保守管理計画書を作成し、管理者権限の扱い、アクセスする際のルールや手順を定め、施設の承認を得る必要がある。

③ VPN 装置を用いる場合はファームウェアを最新に保ち、脆弱性のない状態を担保する必要がある。IP アドレスについても、なりすましのリスクがゼロでないことに留意する必要がある。

④ 通信事業者の回線端末と手術支援ロボットの通信端末の施設内接続は、物理的もしくは論理的に他回線と分離することが必須である。

2) 手術支援ロボット（情報処理端末を含む）のセキュリティ対策

① 現地施設と遠隔施設の手術支援ロボット間、もしくは情報処理機器端末間の通信暗号化装置の装備が必要である。

② 手術支援ロボットの制御システム内の OS やミドルウェアなどの脆弱性情報を常に確認し、脆弱性が発見された場合はその深刻度に応じて修正プログラム（パッチ）の適用等の対策を可及的速やかに講じる必要がある。

③ 手術支援ロボットに対して全てのパラメータ設定などが行えるアクセス権を有する特権 ID や運用管理者 ID、ロボット操作者 ID 等、ロボットシステムへのアクセス権限の設定について明らかにし、業務上必要な場合に最小限の人員がアクセスするよう認証・認可を行う必要がある。

２．遠隔手術支援の実施体制

（１）遠隔手術支援実施に関する施設における手続き

遠隔手術を行うためには、現地施設および遠隔施設において本ガイドラインに示す遠隔手術の提供体制・実施体制を整備するとともに、それらが施設の安全管理体制（医療安全管理委員会等）によって承認されていることが求められる。

遠隔手術支援を新たに実施するにあたり、現地施設および遠隔施設は医療法に定める高難度新規医療技術に準じた措置を講じて施設の承認を得ることが求められる。なお、高難度新規医療技術に求められる措置は、特定機能病院において承認要件として義務づけられており、特定機能病院以外の病院においては院外の高難度新規医療技術評価委員会へ審査の委託が可能である。

（２）遠隔手術支援を実施可能な術式

原則として「内視鏡手術用支援機器を用いる手術」として保険収載されているロボット支援下手術は、遠隔手術支援としての実施が認められる。ただし、手術支援ロボットの機種ごとに保険適応として認められる術式が異なることに留意する必要がある。また、領域別の関連学会の定める規定に従って実施しなければならない。

（3）遠隔手術支援の準備

1）現地術者および現地手術スタッフ教育

遠隔手術支援を導入するにあたり、現地術者および現地手術スタッフは、遠隔手術支援の臨床見学を行い、自施設での実施準備に活用することを推奨する。

遠隔手術支援に携わる現地スタッフは、運用マニュアルを作成するとともに定期的なカンファレンスや勉強会等を開催し、スタッフ間で十分な教育体制を構築する必要がある。マニュアルは遠隔手術支援の実施に際し、現地施設および遠隔施設間で共有し、適宜、見直しを行わなければならない。

2）症例に関する事前検討

現地術者および現地手術スタッフ、ならびに遠隔術者は遠隔手術支援を行うことの妥当性（患者状態、疾患、術式等)、現地術者と遠隔術者の役割分担、術式変更の可能性、遠隔手術の実施が困難になった際の対応等についてカンファレンスを開催して十分な検討を行い、その内容を診療録に記載しなければならない。

カンファレンスにWEB会議システム等を利用する際には患者の個人情報の取り扱いにつき事前に患者の同意を得るとともに、関係するガイドライン等を遵守した適切なセキュリティ管理が必要である。

3）患者への術前説明と同意取得

患者との同意取得の際、現地術者あるいは現地手術スタッフの医師は、一般的な手術前の説明に加え、遠隔手術支援の概要、遠隔術者に関する情報、遠隔手術支援の利点、および生ずる恐れのある不利益等について患者に以下の内容を含めて説明し、同意を取得しなければならない。

①遠隔手術支援では、遠隔術者が遠隔施設において手術支援ロボットを用いて一部の手術操作を行うこと

②患者の個人情報や疾患の状態が遠隔術者に提供されること

③手術支援ロボット間で情報通信機器等に不具合があった場合などにおいても、現地術者や現地手術スタッフにより施行中の手術を安全に継続可能であること

④現地施設および遠隔施設は第三者による不正アクセスや情報漏洩等のセキュリティに十分に留意し防止策をとっていること

4）通信環境および実施環境の事前確認

現地施設および遠隔施設は、本ガイドラインに示す遠隔手術支援のための提供体制・実施体制が整備されていることを、事前に施設の安全管理体制（医療安全管理委員会等）によって承認されていなければならない。

現地施設および遠隔手術スタッフは、事前に両施設間で通信環境および実施環境についてチェックリストを用いて確認する必要がある。チェックリストには、①手術支援ロボット、②各種デバイス、③現地施設および遠隔施設間の映像・音声の通信シス

テムそれぞれの稼働状況を含まなくてはならない。

（4）遠隔手術支援中の安全確保

遠隔手術支援中の緊急事態発生に備え、現地施設および遠隔施設の手術室間で緊急連絡が可能な手段を確認しておく必要がある。

遠隔手術支援の実施に際し、現地手術スタッフおよび遠隔手術スタッフには、使用する手術支援ロボットの保守管理に精通した臨床工学技士が含まれることを必須とする。また、手術支援ロボット製造販売元の担当者へ緊急連絡が可能な体制を確保しなければならない。

遠隔手術支援の実施日時等の情報は、施設における通信環境等の情報基盤の保守管理を行う部署（医療情報部等）と共有し、手術支援中に通信回線に異常が発生した際には速やかに連絡を行う体制が必要である。また、回線を提供する通信事業者に緊急に問い合わせが可能な体制が望ましい。

（5）遠隔手術支援中の有害事象発生時の対応

現地・遠隔術者および現地手術スタッフは術中の緊急事態発生時に備え、事前に「緊急時の対応マニュアル」を作成し、これを共有する必要がある。

遠隔手術支援中に手術が適切に実施できない状況や、患者の安全確保が困難な状況が発生した場合、現地術者あるいは現地手術スタッフが主体となり、速やかに遠隔手術の中断あるいは中止を判断し、「緊急時の対応マニュアル」に従った対応を進めなければならない。

マニュアルには遠隔手術支援の中断・中止の判断基準と、通常手術への移行手順を含み、定期的な見直しを行わなければならない。

（6）遠隔手術支援中の術式変更

遠隔手術支援中、現地術者および遠隔術者による協議で術式の変更が必要と判断された場合には、変更後の術式がガイドラインで許容された術式であり、遠隔手術支援が困難になった場合でも現地施設で完遂が可能である場合に限り、遠隔手術支援の続行を許容する。

3．遠隔手術支援における責任の按分

遠隔手術支援に関連する診療行為や術後合併症を含めた結果については、原則として現地術者および現地施設管理者がその責任を負う。また、現地術者および現地施設管理者は症例毎に遠隔術者および遠隔施設管理者との間で、責任の按分の有無（“有”の場合はその内容と程度）についてあらかじめ十分な検討を行い、合意書もしくはこれに代わ

る記録を作成する必要がある。

4．遠隔手術支援における患者と医師の関係

遠隔手術支援は「オンライン診療指針」における D to P with D の形態とみなされ、現地術者は主治医又はそれに準ずる医師として患者を直接診療している必要がある。一方、遠隔術者は患者の診療を行わずに遠隔手術支援に参加することができる。

5．遠隔手術支援における費用負担

遠隔手術支援は、遠隔術者の専門的な技術を生かした D to P with D のオンライン診療形態であり、遠隔術者の参加によって標準もしくは標準以上の診療の質が担保される。遠隔手術支援が保険診療として行われる場合の診療報酬上の扱いについては現時点では未確定であるが、少なくとも通常行われる同一術式と同等またはそれ以上に評価されるべきである。

遠隔手術支援では、現地で発生する手術費用の他、手術支援を行う遠隔施設側の人件費や施設・設備費、さらには通信回線費用が新たに発生する。特に、通信セキュリティ水準の高い帯域保証型の回線の使用料は現時点では高額であり、これらの調達方法や費用負担の方法については今後の課題である。手術支援ロボットによる支援先の拡大という観点からは多地点接続が可能な仮想専用回線の利用が望ましく、手術支援ロボットの操作に必要な最低帯域を保証する経済性の高い通信サービスの登場を推進する必要がある。本来、遠隔手術支援は遠隔地に居住する高齢者など移動の難しい患者を対象として運用することを考慮すると、公的助成の対象とすることの検討も望まれる。

III. 各論 2：遠隔手術指導（Telementoring）

本ガイドラインにおける遠隔手術指導とは、ロボット支援下手術、腹腔鏡下手術、開胸・開腹手術などの手術方法にかかわらず、遠隔手術指導者が画像や音声を用いてリアルタイムに現地術者を指導することと定義する。

１．遠隔手術指導の提供体制

（１）遠隔手術指導を行うための通信環境（ネットワーク環境）の要件

1） 遠隔手術指導に用いる通信環境は、伝送する映像の情報量、求められる通信の安定性と完全性、リアルタイム性、経済性によって大きく異なる。そのため、遠隔手術指導の内容に応じて適切な通信環境を構築し、実施する必要がある。

2） インターネット接続を伴うオープンな回線や、いわゆるベストエフォート型回線は、通信遅延、遅延揺らぎ、パケットロスが時々刻々と変わりうる回線であり、さらに、遠隔手術指導時の通信環境が事前確認時とは大きく異なることに留意すべきである。

（２）遠隔手術指導に必要な情報セキュリティ対策

遠隔手術指導において、患者の個人識別情報を取り扱う場合には、遠隔指導者、現地術者、現地手術スタッフ、現地施設管理者は最新版の「医療情報システムの安全管理に関するガイドライン」、ならびに現地施設および遠隔施設の情報セキュリティポリシーに従って情報セキュリティ対策を講じる必要がある。

1） 医療に関する患者情報（個人識別情報）を含む遠隔手術指導環境を提供する受託事業者は、「医療情報を取り扱う情報システム・サービスの提供事業者における安全管理ガイドライン」、および現地施設、遠隔施設の情報セキュリティポリシーに従って情報セキュリティ対策を講じる必要がある

2） 遠隔手術支援の一部として遠隔手術指導が行われる場合や、高いリアルタイム性が求められる手術指導の場合には、遠隔手術支援に準じて情報セキュリティ対策を講じる必要がある。

3） 医療に関する患者情報（個人識別情報）を取り扱わない場合であっても、手術室映像にスタッフの個人情報が含まれないよう措置するなどの個人情報保護対策を講じる必要がある。

4） VR 等の先進機器を用いた遠隔手術指導を行う場合、当該システム内の OS やミドルウェア及びファームウェアなどの脆弱性情報を常に確認し、脆弱性が発見された場合はその深刻度に応じて修正プログラム（パッチ）の適用等の対策を可及的速やかに講じる必要がある。また、遠隔手術指導システムの利用者及び保守運用者等の別に適切な主体認証及び権限設定を行うこととし、業務上、必要最小限の人数にと

どめると共に、利用実態に則したものとする必要がある。

２．遠隔手術指導の実施体制

（１）遠隔手術指導が実施可能な術式

保険収載されているすべての術式は遠隔指導の対象として実施可能である。

（２）遠隔手術指導の準備

１）症例に関する事前検討

現地術者および遠隔指導者は、当該患者の治療に遠隔手術指導の内容について十分な検討を行い、現地施設の診療録に記載しなければならない。遠隔指導者との検討には患者の個人情報の取り扱いについて事前に患者の同意を得る必要がある。

２）患者への術前説明と同意取得

患者との同意取得の際、現地術者あるいは現地スタッフの医師は、一般的な手術前の説明に加え、遠隔手術指導の概要、遠隔指導者に関する情報、遠隔手術指導の利点、および生ずるおそれのある不利益等について患者に説明しなければならない。

３）通信環境および実施環境の事前確認

現地術者および現地手術スタッフ、遠隔指導者は事前に両施設間で通信環境および使用するデバイスの作動状況を確認する必要がある。

（３）遠隔手術指導中の有害事象発生時の対応

遠隔手術指導中に手術が適切に実施できない状況や患者の安全確保が困難な状況が発生した場合、現地術者あるいは現地手術スタッフが主体となり、速やかに遠隔手術指導の中断・中止を判断しなければならない。

３．遠隔手術指導における責任の按分

遠隔手術指導に関連する診療行為やその結果については、原則、現地術者および現地施設管理者がその責任者を負うが、具体的な内容についてはあらかじめ十分な検討を行い、合意書もしくはこれに代わる記録を作成する必要がある。

４．遠隔手術指導における患者と医師の関係

遠隔手術として遠隔手術指導を行う場合は「オンライン診療指針」における D to D の形態とみなされ、遠隔指導者は患者の診療を行わずに遠隔手術指導を行うことができる。

IV. 各論 3：完全遠隔手術（Full telesurgery）

完全遠隔手術（Full telesurgery）は現地施設に手術を担当できる医師が存在しない状況で、遠隔施設から遠隔術者が手術支援ロボットを用いて手術操作の全てを行うことを想定している。したがって、遠隔手術が中断されても現地術者と現地手術スタッフによって手術が続行される遠隔手術支援（Telesurgical support）とは大きく異なり、実施に際しては極めて高い確実性および安全性が担保されなくてはならない。

加えて、これまで完全遠隔手術と医師法第 20 条（無診察治療等の禁止）との関係性についての解釈が示されていないことから、実施の条件として完全遠隔手術が「オンライン診療指針」で規定される必要がある。このような法的な問題をはじめとして、技術面、倫理面などでも多くの課題があることから、現時点では完全遠隔手術の実施は困難であるが、手術支援ロボットや情報通信技術の革新的進歩に伴い、将来的に社会実装が可能となることが期待される。

V. 参考資料

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』の中で実施された実証研究の概要を以下に示す。

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)。

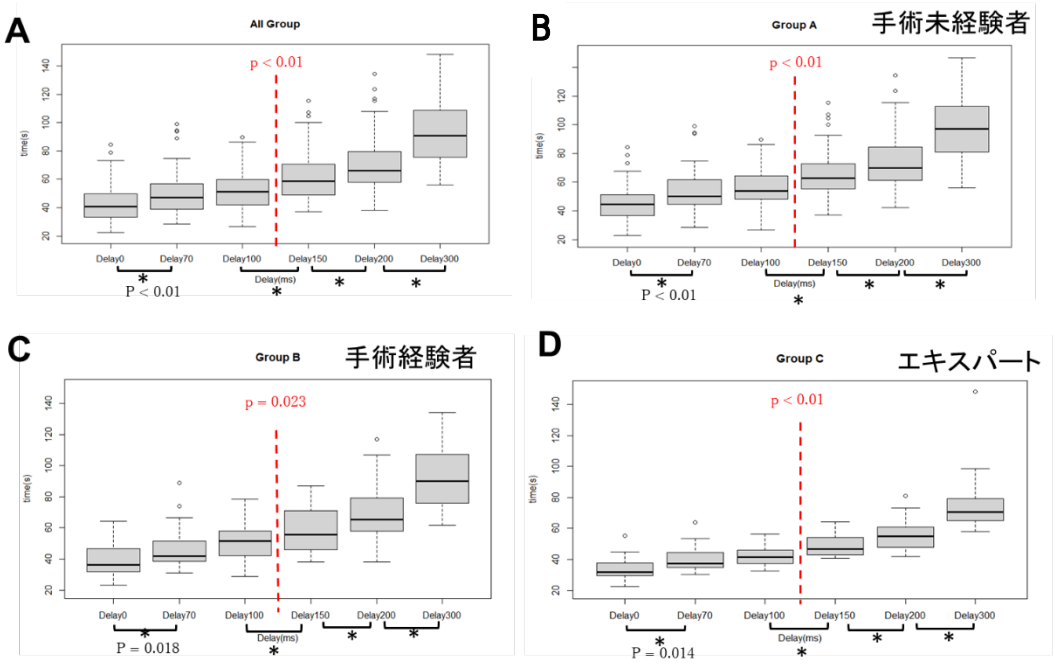
●結論および考察

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

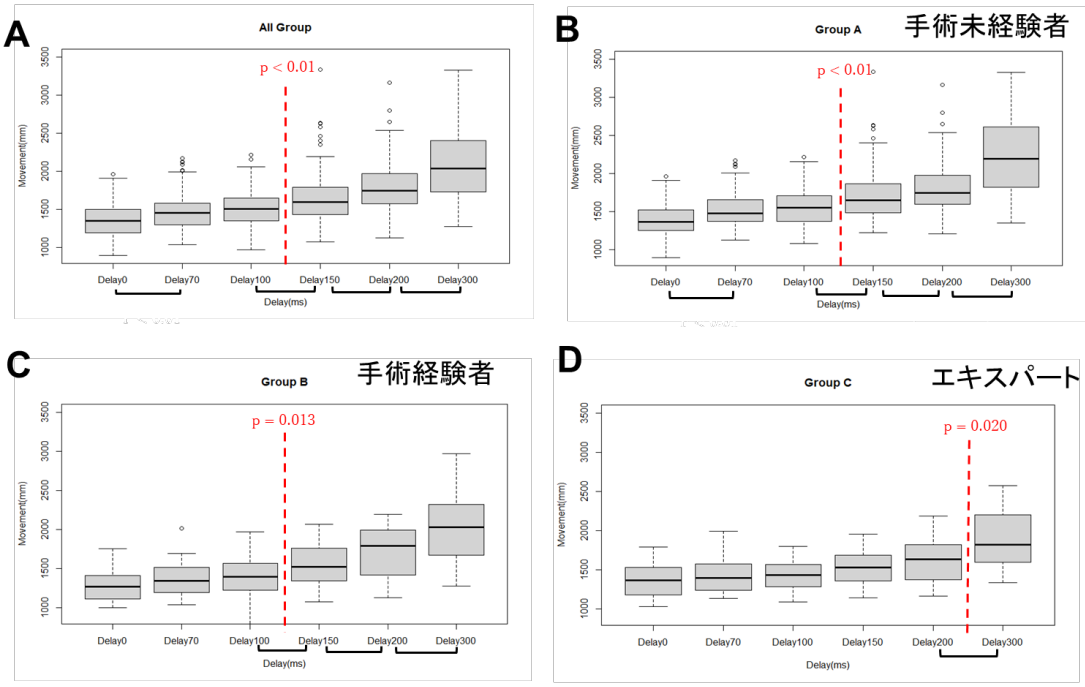
【図１：作業完遂時間に対する通信遅延の影響】

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

結果公表論文投稿中

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―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

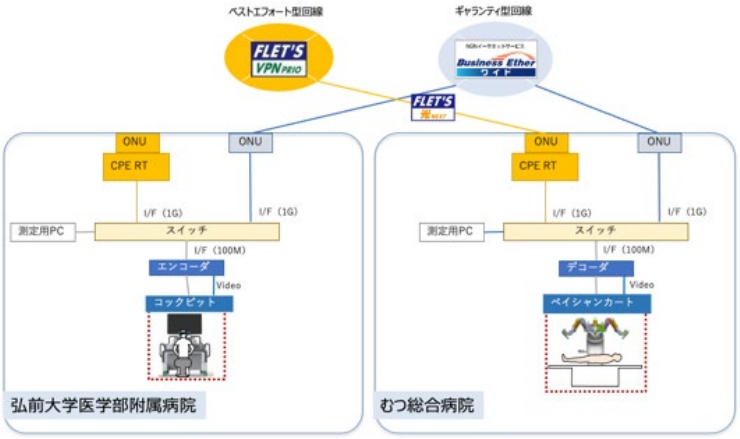
必要帯域未満である 1〜3Gbps の通信環境のもとで、縫合結紮タスクを行なったところ、遅延時間や操作性に変化は認められなかったが、外科医はパケットロスが生じたことによる画像の歪み、粗さ、複視などの画像の劣化を感じ、それにより、疲労度の増加が認められた。

●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。

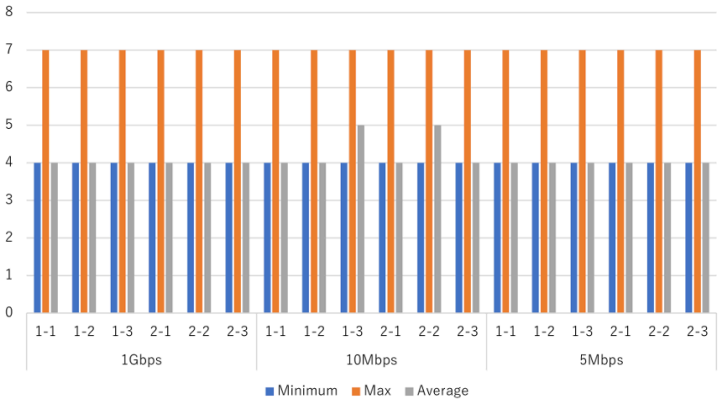
●図表

【図１：システム構成】

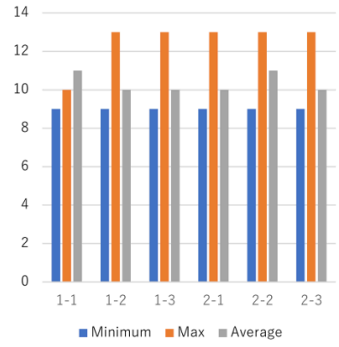


【図２：タスク中の通信遅延の例】

(a)ギャランティー型回線

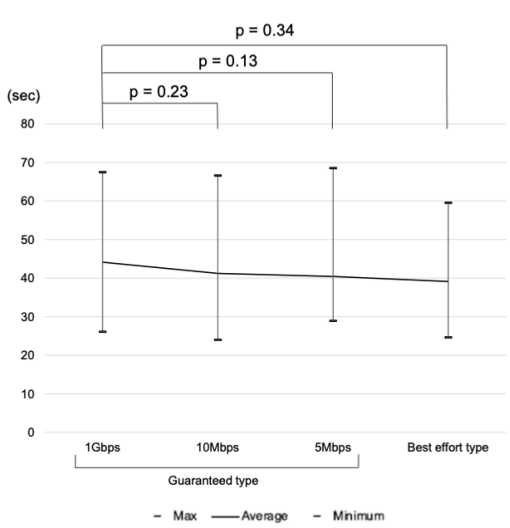


(b) ベストエフォート型回線

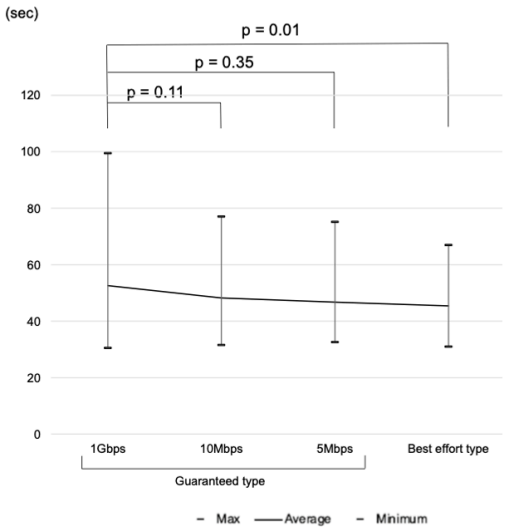


【図 3a：ロボットタスク時間】

(a) 順番通りの鉗子の移動タスク

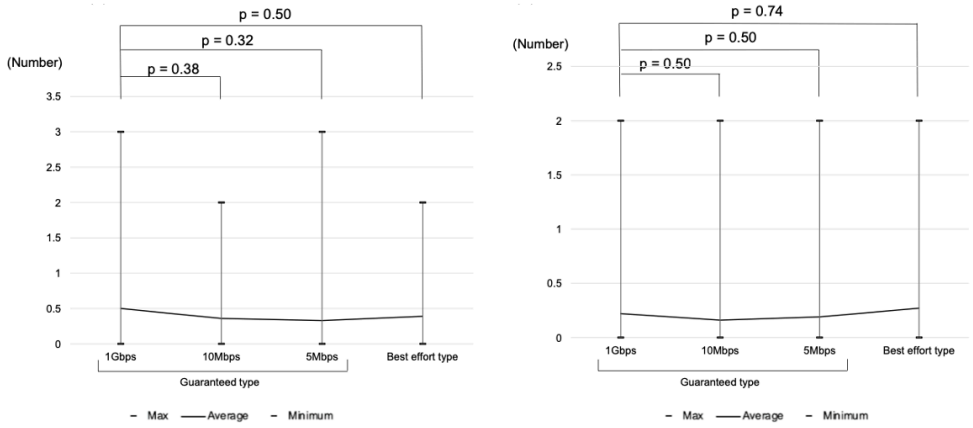


(b) 糸の手繰り寄せタスク



【図 3b：ロボットタスクエラー回数】

(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



●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

４）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）。

５）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

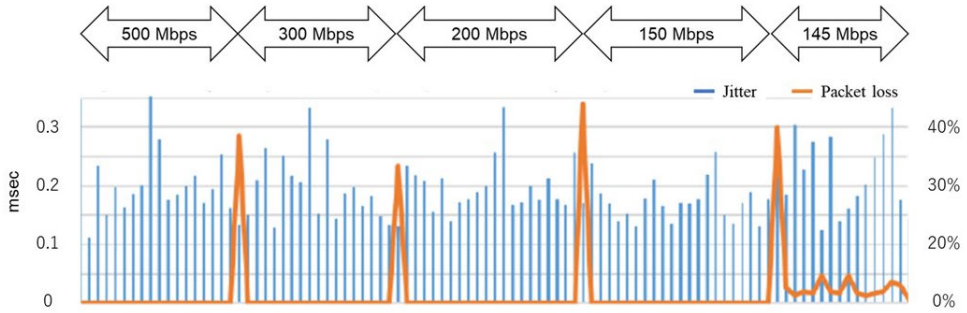
遠隔手術用ロボット hinotori™ における通信遅延は 30 msec であり、通信帯域 145 Mbps において画像の劣化が認められた。通信帯域 145 Mbps においては、画像の劣化に起因したと考えられる作業完遂時間の延長、作業スキルの低下、外科医の疲労度の増強が認められた。

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。

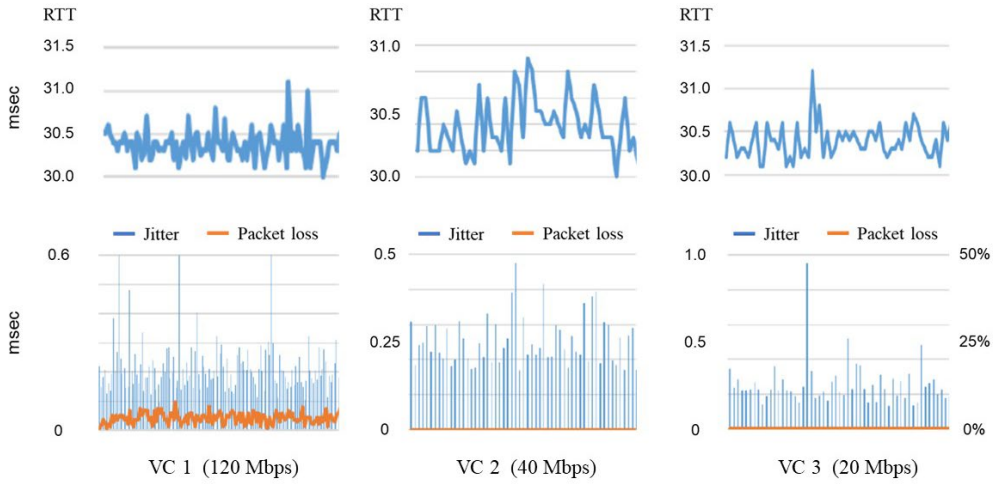


【図２：通信帯域 145 Mbps における画像の劣化】

通信帯域 145 Mbps において、画像の劣化が認められた。

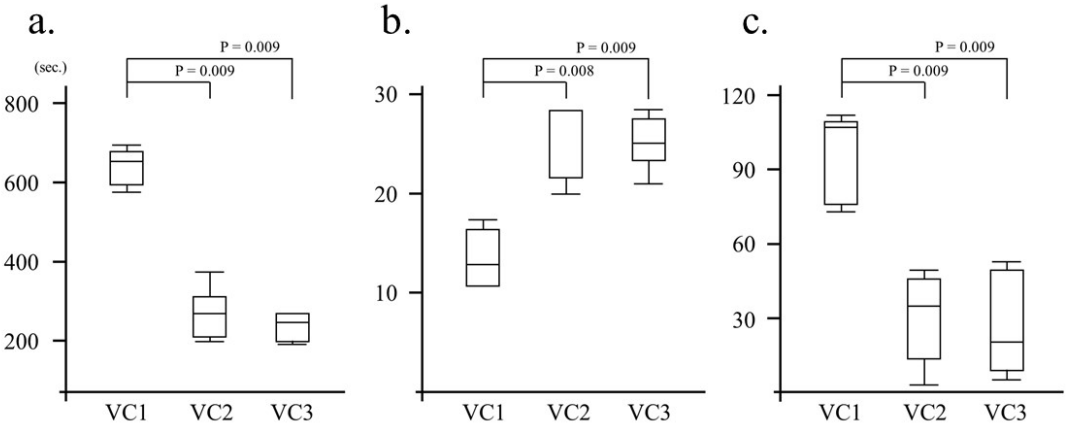
【図 3 ：映像圧縮(VC)量による通信遅延(RTT)、パケットロス、ジッタの比較】

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) 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.

●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, 2022. Online ahead of print.

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。
- 200Mbp 帯域保証型回線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―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

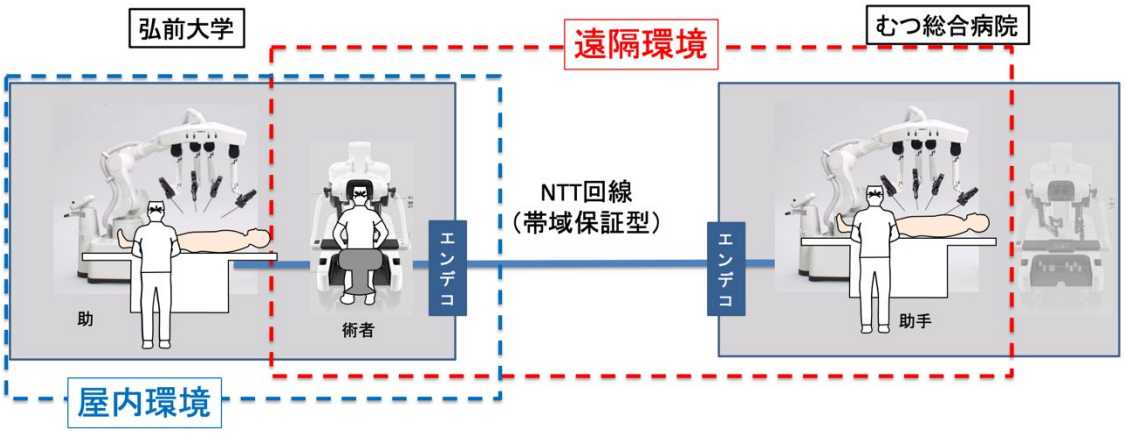
人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術（図 3)、腸管縫合術（図 4）はいずれも遠隔環境と通常の屋内環境との間で正確性、エラー回数、完遂時間に有意差は認められなかった。

●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。

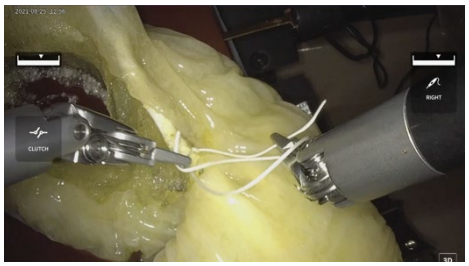
●図表

【図 1 ：システム構成】

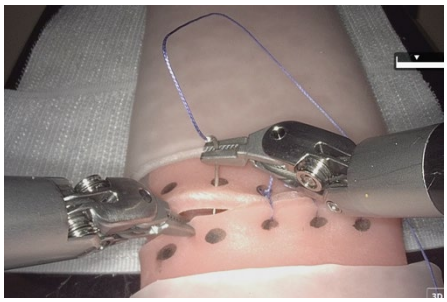


【図 2：物体の移動タスク】

【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

結果公表論文投稿中

実証研究５　手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）。

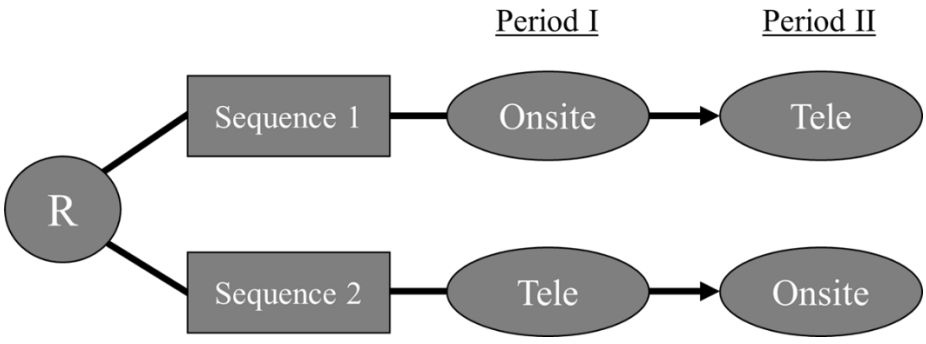
●結論および考察

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と比べ、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

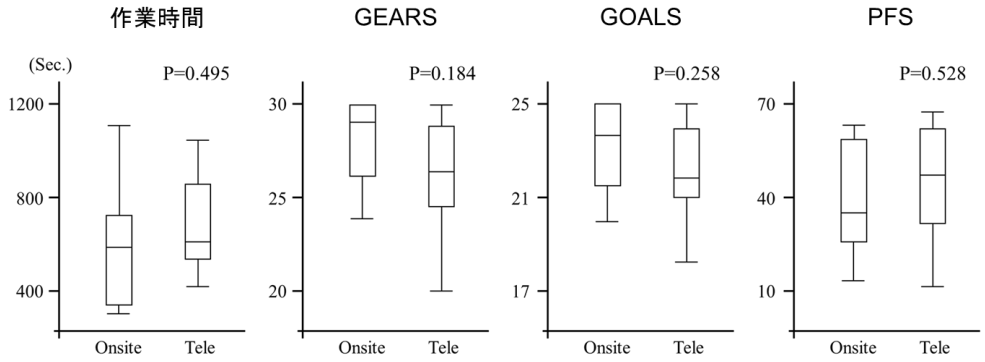
【図１：人工臓器モデルを用いた胆嚢摘出術】

【図２：Randomized single-blind crossover trial】



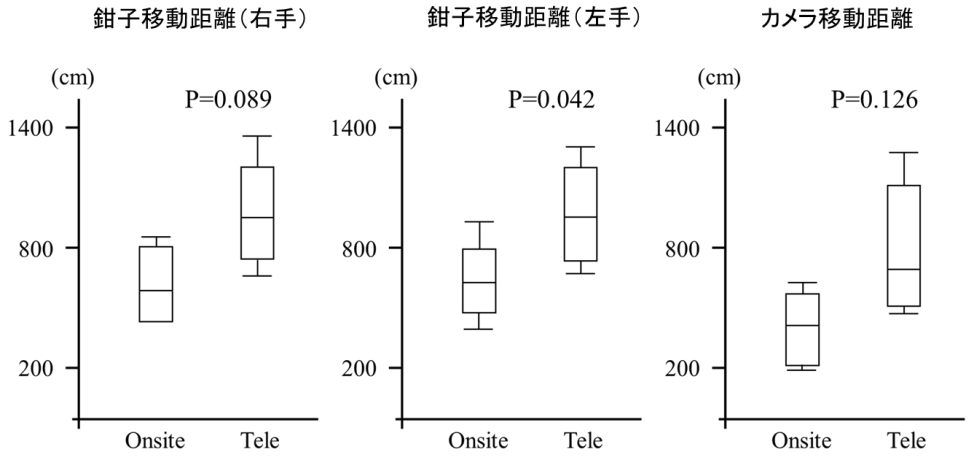
【図３：遠隔手術と現地手術の作業評価】

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

結果公表論文投稿中

実証研究６　遠隔手術のセキュリティー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 10Mbp）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なである。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無かったと回答した。

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

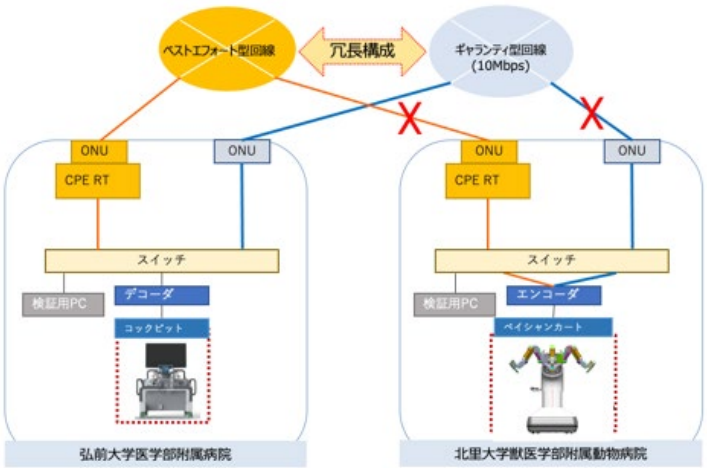
12 名の外科医によるブタを用いた胃切除、直腸切除、胆嚢摘出（図 2）を行い、手術中の継続の可否や画像への影響を検討した。また、通信遮断中の腎静脈からの出血に対する止血操作を評価した。全ての術式においてブタの手術中の回線遮断・復旧によるロボット操作の継続性に影響はなかった。腎静脈穿刺による出血から圧迫止血までに要した平均時間は 8.88 秒、針糸の把持から縫合止血を完了するまでの平均時間は 6 分であり、全例で縫合止血に成功した。

●結論および考察

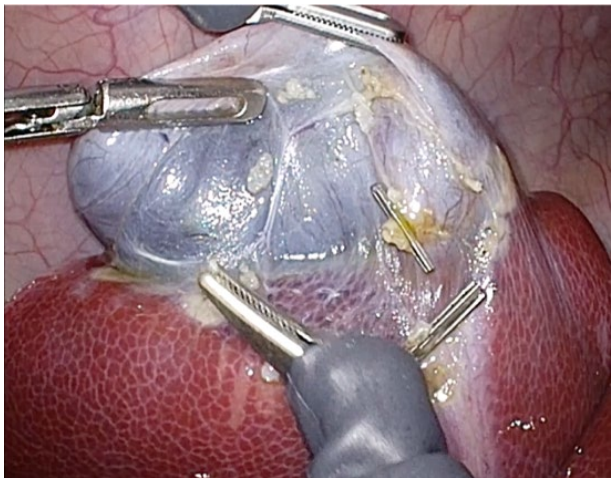
2 系統の通信回線を敷設することにより、遠隔手術時の通信遮断によっても手術中のモニター画像やロボット操作の継続性に影響が無い通信システムを構築することが可能であった。

●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

結果公表論文投稿中

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

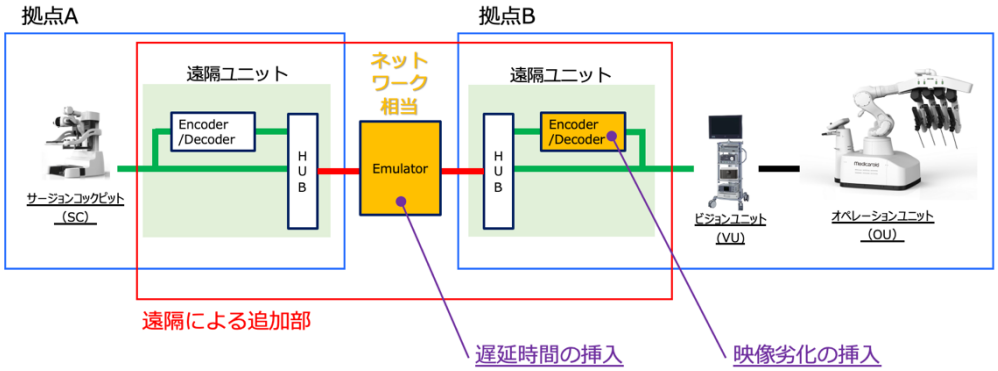
【表 1 ：遅延時間に対する主観評価項目】

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					

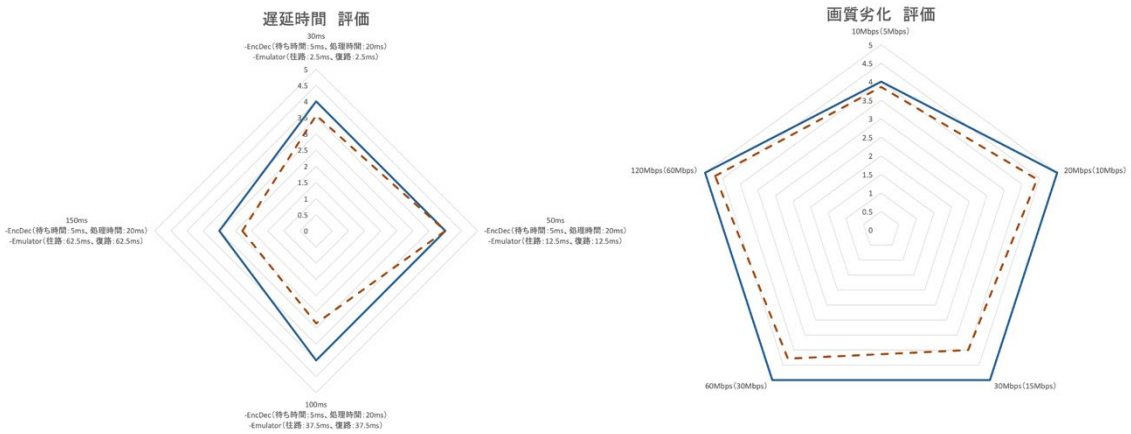
【表 2：映像劣化に対する主観評価項目】

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

結果公表論文作成中

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の検証

●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ンソール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～2021 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 40Mbp）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ンソール（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ンソールを用いて、有効なアノテーションが可能であることを確認し初めて確認した。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ンソール①、九

大病院別府病院にコンソール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 回づつ止血操作を行い、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）。

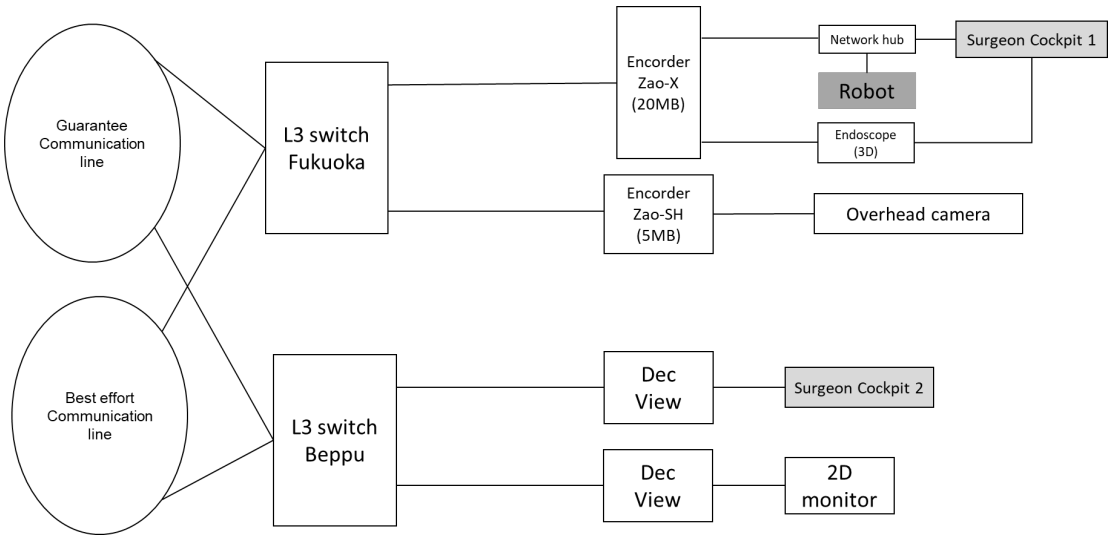
●結論および考察

本実証実験では、ダブルコンソールのシステムを用いて、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 40Mpbps 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。

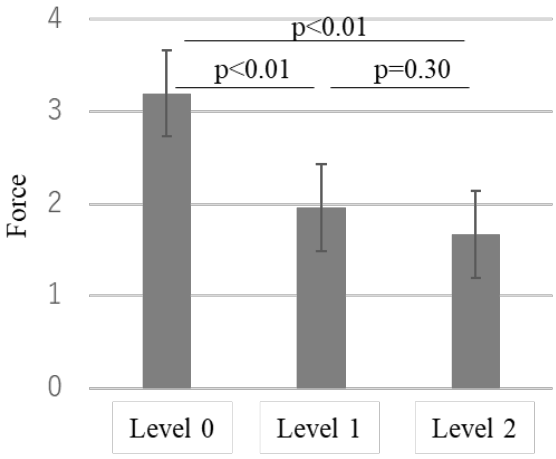
●図表

【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 であったが、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。

	Ipsec 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

結果公表論文作成中