

遠隔手術の社会実装に求められる技術要件の解明と社会実証研究

(Elucidation of technological requirements for social implementation of telesurgery and social empirical research)

弘前大学医学部附属病院 消化器外科・乳腺外科・甲状腺外科
諸 橋 一

要旨

2000年代初頭、遠隔手術は技術が未成熟のために一度頓挫したが、情報通信技術の発達と新たな手術ロボットの開発によって実現の可能性が高まっている。折下、外科医不足と地域偏在が社会問題化する日本では、遠隔手術は地域医療が抱える課題解決の方略としての期待が大きくなっている。我々は遠隔手術の実現のための技術要件の解明と社会実証研究に取り組み、2021年2月には国内初となる遠隔ロボット手術の実証実験を弘前大学医学部附属病院とむつ市のむつ総合病院間で行い、成功した。更に、遠隔手術に求められる情報通信技術に関わる基礎的研究を行い、十和田市の北里大学獣医学部附属病院との間で生体（ブタ）に対する遠隔手術にも成功した。遠隔手術に必要な技術と課題が段階的に解明し、国産ロボットと国内通信会社による遠隔ロボット手術や遠隔手術支援の社会実装に向けて準備が整いつつある。

背景

日本におけるロボット手術は2012年に前立腺手術に対する保険治療が認められて以来、泌尿器科領域を中心に症例が増加し、その有用性が広く認められてきた。2018年4月に消化器外科領域、婦人科領域、呼吸器外科領域の12術式が保険収載されて以降、大腸領域での手術件数が20倍に増加したことをはじめ、複数回の改訂を経て、適応症例が飛躍的に増加している。また、新たなデジタル技術の搭載により、これまでのアプローチ方法ではなし得なかった高度な手術を提供することが期待されている。その中のひとつに遠隔手術がある。ロボット手術は操作信号や映像情報のデジタル化により、術者が患者に直接接触することなく、コックピットからロボット本体を操作しながら手術を行うことを可能とした。手術室内環境の患者と外科医の距離を更に遠くに引き離し、手術室を超えた遠隔地から患者の手術を行うことで、ロボットを用いた遠隔手術を実現することができる。

遠隔手術は既に2001年にアメリカとフランスの間で世界初の遠隔胆嚢摘出術が行われている。しかし、専用の通信回線の経済性や安全性、通信遅延など多くの課題が解決できなかったため、その後の普及は進んでいない。近年、日本では、手術支援ロボットの技術の発展と高速大容量通信技術の進歩を背景に高度な技術を有する医師のサポートを受けながらの、遠隔手術への期待が高まりつつある。2019年7月の「オンライン診療の指針」改訂で遠隔手術がオンライン診療に含まれたことにより、遠隔手術の法的環境が整い、2022年6月には日本外科学会により遠隔手術のガイドラインが策定され、遠隔手術の社会実装が実現しつつある。

我々は2021年2月に日本初となる商用回線を用いたロボット遠隔手術の実証実験を行い、日本で遠隔ロボット手術を可能とするシステムを構築できることを報告した¹⁾。その後も遠隔手術の実現に必要なロボット技術、通信回線の必要帯域、遅延の許容範囲、通信情報処理、通信の安全性などに関する実験を重ねてきた (Table 1)。今回、これまでの研究から得られたロボット遠隔手術の社会実装に求められる技術要件の解明と課題について論じる。

Table 1 弘前大学で行われた遠隔手術の実証実験

実験期間	実験フィールド	使用ロボット	通信回線	操作対象	検証項目
2021年 2月	弘前一むつ	Saroa TM	NTT東日本	基本操作モデル	通信帯域、通信遅延、外科医の疲労度
2021年 8月	弘前一むつ	hinotori TM	NTT東日本	人工臓器モデル	屋内環境と遠隔環境の比較
2021年10月	弘前一十和田	Saroa TM	NTT東日本	人工臓器モデル ブタ	2回線による通信の冗長性の検討
2021年12月	神戸	hinotori TM	模擬遠隔環境	ブタ	許容される遅延と画像圧縮
2023年 2月	神戸	hinotori TM	模擬遠隔環境	ブタ	教育ツールと教育に許容される遅延
2023年 3月	弘前一むつ	Saroa TM	NTT東日本 ソフトバンク KDDI TOHKnet	人工臓器モデル	複数の通信事業者による通信の冗長性の検討

研究方法と結果

ロボット遠隔手術に必要な通信システムの構築

リバーフィールド社の SaroaTMを NTT 東日本回線の光回線（以下 NTT 回線）を用いて、約150km 離れた弘前大学医学部附属病院（以下弘大病院）とむつ総合病院の間を接続し、遠隔手術システムを構築した。本研究は国産ロボットと国内通信回線を用いた日本初の実証研究であり、通信遅延が遠隔手術に影響がないとされる100ms 以下であることを実証することで、今後、日本で遠隔ロボット手術を実用化するうえで全てのベースとなる報告となった。また、必要な通信帯域を準備しないことによる遠隔画像の劣化が遠隔手術中の外科医の疲労度を増加し、手術成績を低下させる可能性も報告した²⁾。

ロボット手術における遠隔環境と屋内環境の同等性の証明

遠隔手術における通信遅延や画像情報は通信環境や手術支援ロボットの種類により異なるため、様々な通信回線、情報処理システム、手術支援ロボットの組み合わせで屋内環境と遜色なく手術を行うことができるか検証する必要がある。メディカロイド社の hinotoriTMをNTT回線で、弘大病院とむつ総合病院の間を接続し、屋内環境下と遠隔環境下での模擬手術を比較検討した。その結果、hinotoriTMが遠隔環境でも屋内環境と同等の動作性を有することを示した³⁾。

通信の安全性を担保するための通信の冗長構成

遠隔ロボット手術中に通信障害が発生した場合、手術を継続するための安全な通信システムを構築することは重要である。約108km 離れた弘大病院と十和田市の北里大学獣医学部附属病院を NTT 東日本の主回線と副回線の2本の商用回線で接続し、リバーフィールド社の SaroaTMを用いてブタの遠隔手術を行った。その結果、2本の通信回線を用意することで、通信遮断による手術の中断を回避し得ることを報告した⁴⁾。

ロボット遠隔手術で許容される通信遅延と画像情報の圧縮

通信遅延と画像圧縮が遠隔ロボット手術に与える許容範囲を検証するために、メディカロイド社の hinotoriTMを用いて模擬遠隔環境下でブタに対する手術を行った。その結果、100ms 以上の遅延では手術を行うことが困難であるが、情報圧縮に関してはビットレートが低くても通常の屋内手術と遜色なく行うことが可能であることを示し、遠隔手術における情報処理技術に関する基準を報告した。

ロボット遠隔手術支援に必要な教育ツールの開発と許容される通信遅延

ロボット遠隔手術支援に必要な教育ツールはダブルコックピットにより操作権を切り換えるスワッピング機能と指示を行うためのアノテーション機能である。スワッピング機能とアノテーション機能を搭

載した hinotori™を用いて模擬遠隔環境下でブタに対する手術を行った。教育ツールを用いた指導者側が手術支援をする際の遅延の限界は150msecであった一方、指導される側の遅延の限界は200msecであり⁶⁾、両者の許容範囲には差があることを報告した。

考察

複数回の商用高速通信回線と国産の手術ロボットを用いて遠隔操作を行い、作動状況の検証と通信技術、情報処理技術の検証を行った結果、遠隔手術の社会実装に向けて、通信遅延や情報処理技術などの多くの課題はクリアできると考えられた。

遠隔手術の最大のハードルは遅延の問題である。術者が体感する遅延時間は、通信遅延、情報処理遅延、ロボット遅延の三つの要素からなる。この情報を伝送する過程で最も遅延の原因となるのは情報量が多い映像伝送である。この映像情報をエンコーダ・デコーダの情報処理技術により圧縮・解凍し、通信回線で伝送する際に最も大きな遅延が発生する。遅延の許容範囲に関しては既に多くの研究成果が報告されており、概ね、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。遅延を回避する際には通信情報に適した通信帯域を用意する必要がある。

通信の安全性に関して、2種類の通信回線を用いた冗長構成を行うことで、遠隔手術中の通信遮断に対して通信トラブルが発生した時にも、手術が継続可能であることが生体で確かめられた。遠隔手術中に、予期せぬ通信障害により、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非常に重要なことである。一般に、通信回線の帯域が広く、安全性が強固になるほど、通信の安定とロボット操作の安定が得られるが、それに伴ってコストは高くなる。遠隔手術では、十分な帯域確保と通信セキュリティを前提とした上で、経済性を考慮した通信ネットワークを選択することに課題がある。

近年、地方と都市部での医療格差の広がりや地方での外科医不足が社会問題となっており、青森県も例外ではない。遠隔手術を実現することで、患者の立場からは長距離移動に伴う負担の軽減や地元病院で治療を受ける選択肢が拡大することなど、医療の均てん化に関してメリットが得られる。一方、地域医師の立場からは地域で基幹病院の指導医から直接手術指導や手術支援を得ることができ、若手外科医への教育に大きなメリットがある。遠隔ロボット手術の社会実装はこれからの外科医療や社会問題に変化をもたらすことが期待される。今後は、経済性、倫理性などに関する幾つかの残された課題の検証を行い、臨床応用に繋げていきたい。

結語

日本の商用回線と国産ロボットを用いた遠隔ロボット手術システムの構築に必要な技術要件を研究し、報告した。今後も社会実装に向けて残された課題の検証を行う予定である。

参考文献

- 1) Morohashi H, Kanno T, Kawashima K, Akasaka H, Ebihara Y, Oki E, Hirano S, Mori M. Social Implementation of Remote Surgery in Japan: A Field Experiment using a Newly Developed Surgical robot via Commercial Network. *Surgery Today*. 2021
- 2) 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*. 2022;52:705-714.
- 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*. 2023;7:167-74.
- 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.* 2023;13:10831.

- 5) Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H et al. Verification of delay time and image compression thresholds for telesurgery. *Asian J Endosc Surg*, 2023;16:255-61.
- 6) Takahashi Y, Hakamada K, Morohashi H et al. Effects of communication delay in the dual cockpit remote robotic surgery system. *Surg Today*. 2023