



5G遠隔ロボット手術支援ソリューション

株式会社 NTT ドコモ R&D 戦略部 シニア・テクノロジー・アーキテクト

おくむら ゆきひろ
奥村 幸彦



1. はじめに

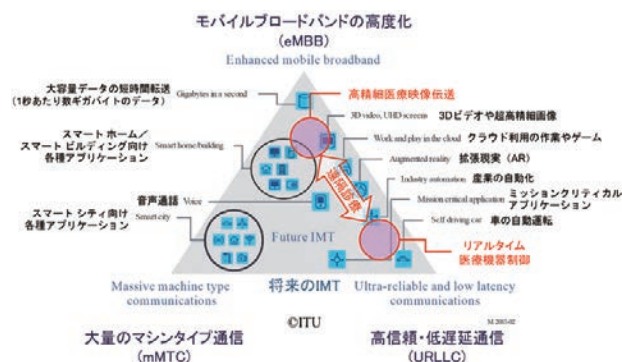
国内において2020年3月に商用サービスが開始された第5世代移動通信システム（5G）は、経済成長に不可欠なICTプラットフォームとして注目され、そのサービスエリアの急速な拡大と多様な端末の出現とともに、5Gを応用した幅広い分野での新しいアプリケーションやソリューションの創出が進んでいる。医療分野においては、新型コロナウイルス感染拡大を契機として5Gを応用する遠隔医療への期待が高まっている状況にあるが、NTTドコモ（以下、ドコモ）では、同応用に関して、5Gの商用サービス開始以前の早い段階から、遠隔医療の様々な領域における実証実験を通して、ソリューション開拓をパートナーとともに進めてきた。

本稿では、5Gの特長とその遠隔医療での応用の概要と初期の実証について述べた上で、最近の5G遠隔医療に関するソリューション開拓事例として、商用5Gネットワークを介して手術支援ロボット（以下、手術ロボット）を遠隔操作するシステムを用いる新しいソリューションとその実証について紹介する。同ソリューションの開拓は、国立大学法人神戸大学（以下、神戸大学）、ドコモ、NTTコミュニケーションズ株式会社（以下、NTT Com）、株式会社メディカロイド（以下、メディカロイド）が、内閣府の地方大学・地域産業創生交付金事業として採択され、神戸市が産学官連携事業として推進している「神戸未来医療構想」の枠組みにおいて2019年より取り組んできているものである。なお、本稿で述べる内容は、2023年5月に開催されたITU-D Study Group 2 (SG2) Question 2/2による“Workshop on adoption of new digital technology for e-health, e-learning and other e-services”において筆者が紹介した内容をベースに解説を加えたものである。

2. 5Gの特長と遠隔医療応用

5Gの主な特長としては、モバイルブロードバンドの高度化（高速・大容量通信）、高信頼・低遅延通信、大量のマシンタイプ通信（多数同時接続）があるが、それらの組合せによる典型的な利用シナリオ（図1）がITU-Rの勧告“M.2083-0: IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”に掲

載されている。ここで、5Gを遠隔医療へ応用するシナリオとしては、例えば、高精細の医療映像を遠隔地へ伝送する遠隔診療が同図中央上の赤丸領域に相当し、また、手術ロボットなど医療機器をリアルタイムかつ高信頼に遠隔制御する遠隔診療が同図右下の赤丸領域に相当する。



■ 図1. 5Gの利用シナリオ

（出典：Recommendation ITU-R M.2083-0, FIGURE2に日本語説明を追加）

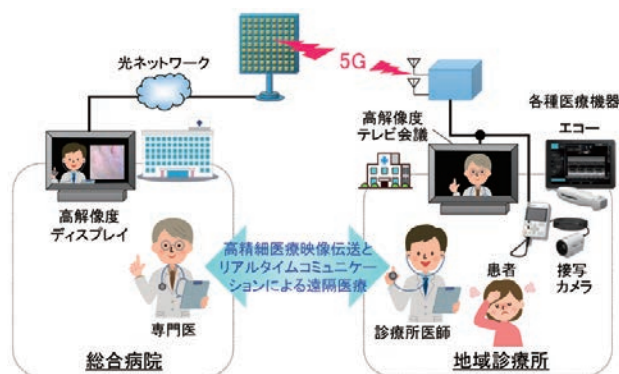
移動通信ネットワークの遠隔医療への応用においては、従来の医師対患者間（Doctor to Patient : D to P）のオンライン診療に加え、より高度な医療の提供が可能となる医師対医師間（Doctor to Doctor [to Patient] : D to D [to P]）の遠隔診療が新たに注目されている。このD to D遠隔診療における基本形態では、遠隔地にいる経験豊富な上級医師（専門医）が、高速通信回線を用いて伝送されてくる各種医療機器の情報（患者の診断映像等）を参照しながら、患者側にいる医師を支援して診断・治療を進める。

図2に、地域医療の現場に適用することを想定した5G応用D to D遠隔診療システムの構成例を示す。山間部、僻地などにある地域診療所において患者を診ている診療所医師に対して、遠隔地の総合病院にいる専門医が5G及び光回線を介して伝送されてきた各種診断情報を参照しつつ、高解像度のテレビ会議を用いてリアルタイムにコミュニケーションしながら支援を行うが、その際、専門医が離れた場所にいることを意識せず、あたかも同じ診察室内にいるかのような状態を再現して遠隔診療を進められることが重要となる。様々な診療科で用いられる各種医療機器のうち、特に映像を用いて診断などを行う機器においては、4K・



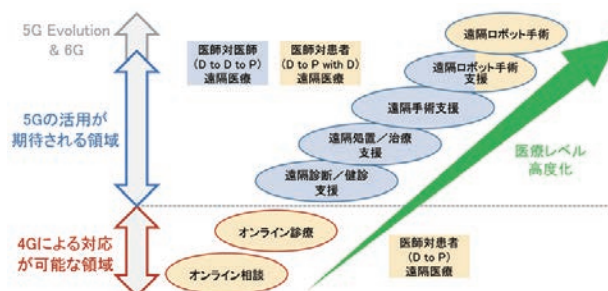
8Kといった高精細映像を用いることで、より正確かつ詳細な診断が可能である。また、診療科や対象疾患によっては即時性を求められるケースがあり、画像・映像情報を低遅延で伝送、参照できることが求められる。

これらの診断情報を遠隔地へ伝送するためには高速・大容量かつ低遅延の通信回線が必要となるが、全国にある診療所やクリニックの中には、例えば山間部等で、近くまで光回線が来ていながら届いていないケースがあり、このようなケースに対しては、未到達区間へ無線回線の5Gを適用し、補完することで遠隔診療に必要な通信回線の確保が可能となる。一方、遠隔地にいる専門医の側のネットワーク接続手段としても5Gを適用することが可能であり、出張先等、病院外に専門医がいるときにも遠隔診療が行えることでタイムリーに高度医療を提供できる。



■図2. 5Gを用いるD to D遠隔診療システムの構成例

ところで、D to Pのオンライン診療においては、通信回線として4Gが用いられているが、D to D遠隔診療においては、これまで述べたように5Gを用いることで、従来にない遠隔医療を提供できる可能性があり、図3に示すように必要な技術の積み上げを行いながら、より高度な遠隔医療を段階的に実現していくことが期待される。ドコモでは、2017年に、D to D遠隔診療のうち、遠隔診断/健診支援に5Gを活用するソリューションの検討に着手し、その実証をパートナーとともに進めてきた。5Gの実験装置を用いて地域医療や救急医療の各領域における実証実験を行い、当該ソリューションの有効性を確認してきた。更に高度な治療・手術を、遠隔地にいる上級医師が5Gを介して支援する遠隔治療/手術支援ソリューションの検討と、段階的な実証実験を推進してきている。これらの取り組みの成果は、本誌記事^[1]において解説するとともに、ITU-D Q2/2のOutput Report^[2]、Annual deliverable^[3]において、日本の5G遠隔医療の実証事例として紹介されている。



■図3. 移動通信を用いる遠隔医療の高度化ステップ

3. 5G遠隔ロボット手術支援ソリューション

3.1 取り組み経緯

本節では、5G遠隔診療に関するこれまでの取り組み経験も生かし、図3に示した更に高度なレベルの医療ソリューションである「遠隔ロボット手術支援」の実現に向けた取り組みについて紹介する。

まず、本ソリューションの検討を開始した背景を以下に述べる。

- ・現在、国内の医療現場において利用が拡大しつつある手術ロボットは、身体への負担が軽い低侵襲手術を可能とし、今後適応する疾患が増えることで更に需要が高まると想定される。
- ・しかしながら、外科医を志望する若手医師の減少や、ロボット支援下手術（ロボット手術）を指導できる熟練外科医の不足から、手術ロボットの導入が都市部の医療機関に集中し、地方の医療機関への普及が思うように進んでいない。これに伴い、地方における若手の外科医に対する教育の機会が更に減少し、地域格差が拡大しつつある。また、都市部における外科医の労働時間の増加も懸念されている。

以上のような手術ロボット利用を取り巻く状況に対して、本ソリューションの実現は、都市部にいる熟練外科医が、地方におけるロボット手術の遠隔支援や若手外科医の遠隔指導などを可能とする仕組みの提供により、手術ロボット利用の現状を大きく改善し、日本の外科医療の均てん化（全国の外科医療における格差の是正）に貢献することが期待される。2019年に着手した本取り組みは、5G遠隔医療に手術ロボットを適用する際の技術的課題の洗い出しと、それらの課題を克服するため、2020年からは、全国で高速・低遅延通信が可能なドコモの商用5Gネットワーク及びクラウド基盤を用いた実証実験をパートナーと連携して進めている。



3.2 システム構成

本ソリューションのシステム構成イメージを図4に示す。左側の手術室内には、手術ロボットのオペレーションユニットと、これに接続されたサージョンコックピット（ローカル）が設置され、同コックピットに着座した執刀医がオペレーションユニットを操作しながら患者に対する内視鏡手術を行う。オペレーションユニットは、更に商用5Gネットワークとクラウド基盤を介して遠隔操作側にあるサージョンコックピット（リモート）にも接続されており、遠隔地にいる別の外科医がオペレーションユニットを操作することも可能である。

ここで、手術室側と遠隔操作側の2つの拠点間を接続する通信ネットワークとして、医療機関（病院）が施設内に敷設済みの構内ネットワーク（LAN）と拠点間を結ぶ外部通信ネットワークを組み合わせて利用することも考えられるが、この場合、拠点ごとの通信能力にバラつきがあり、必要な通信能力を満足できないケースも想定される。これに対し、通信ネットワークとして高速・低遅延通信が可能な商用5Gネットワークを活用することで、全国の医療機関において、手術ロボットの遠隔操作に必要な高精細手術映像（3D）とロボット制御用信号、各拠点の医師が互いにコミュニケーションするための音声情報などを一括伝送してリアルタイムにやりとりすることができる。さらに、商用5Gネットワークは、手術ロボットとの接続方式（インターフェース）の統一化を可能とし、所望の品質の通信回線を短期間かつ低コストで確保できるメリットがある。



■ 図4. 5G遠隔ロボット手術支援ソリューションのシステム構成イメージ

以下、図4に示した実証システムの主要パートについて説明する。

最初に手術ロボットであるが、図5 (a) に示すメディカロイド製国産手術ロボット「hinotori™サージカルロボットシ

ステム」を使用する。このロボットシステムは、内視鏡手術を行うためのロボットアームを備えたオペレーションユニット、執刀医がロボットを操作するためのサージョンコックピットなどから構成され、2020年8月に国産初の手術ロボットとして製造販売承認を取得^[4]し、同年12月に1例目の手術に成功^[5]した。オペレーションユニットのロボットアームは、ヒトの腕に近いコンパクトな設計で、アーム同士やアームと助手の医師との干渉を低減し、より円滑な手術が可能である。また、サージョンコックピットは、執刀医が3Dビューアをのぞき込みながら、手や足を使ってオペレーションユニットを操作するもので、執刀医の負担軽減のため、執刀医の姿勢



(a) サージカルロボットシステム



(b) 5Gデバイス



■ 図5. 5G遠隔ロボット手術支援ソリューションのシステム構成機器



に合わせられるよう人間工学的な手法で設計されている。

次に5Gデバイスであるが、実証に使用した複数デバイスのうち、一例としてパナソニック コネクト製の「5Gゲートウェイ」を図5 (b) に示す。Sub6帯 (3.7GHz/4.5GHz帯) とミリ波帯 (28GHz帯) の各5G用周波数帯をサポートしたCPE (Customer Premises Equipment) タイプのデバイスで、連続通信時の温度上昇を抑え、長時間使用でも安定して高速通信が可能な据え置き型のデバイスである。

続いて図5 (c) にドコモの商用5Gネットワークとクラウド基盤を示す。商用5Gネットワークは、当初NSA (Non Stand Alone) 構成により実験を行い、後にSA (Stand Alone) 構成による実験も開始した。また、クラウド基盤は、「docomo MEC[®]」をベースとし「MECダイレクト[®]」を併用した。docomo MEC (Multi-access Edge Computing) は、インターネットは使わず、ドコモが提供するネットワーク内の接続デバイスにできるだけ近い場所にサーバーを配置するクラウドサービスであり、さらに、MECダイレクトを適用することで、接続デバイスとクラウド基盤を直結して通信経路を最適化する。これらのネットワークインフラの採用により、手術室と遠隔拠点間で機密性の高い情報を高速、低遅延、かつ安全にやりとりすることが可能である。

4. 5G遠隔ロボット手術支援の実証実験

4.1 基本実証実験

本ソリューションの基本機能を確認するため進めた実証実験は、神戸医療産業都市 (兵庫県神戸市) にある「統合型医療機器研究開発・創出拠点 (MeDIP)」内に手術室側の部屋を確保し、手術ロボットのオペレーションユニットとサージョンコックピット (ローカル) を設置した。また、「神戸大学医学部附属病院国際がん医療・研究センター (ICCRC)」内に遠隔操作側の部屋を確保し、遠隔地からロボット操作するためのサージョンコックピット (リモート) を設置した。MeDIPとICCRCは互いに隣接する建物内にあるが、それぞれに設置したシステム構成機器は、ドコモの商用5Gネットワーク (NSA構成) を介して他県にあるdocomo MECのサーバーと接続されており、全国の5Gサービスエリア内のいずれの場所にシステムを構築した場合でも同様の実験環境が再現できる。

2021年2月、この実験システムを使用して泌尿器科の医師が手術ロボットの遠隔操作を行い、泌尿器科手術の模擬手術を行うことに成功した^[6]。図6に示す運針の操作や、骨盤壁から脂肪を剥離する操作などを試行し、遠隔操作



(a) 運針の様子



(b) 骨盤壁から脂肪を剥離する様子

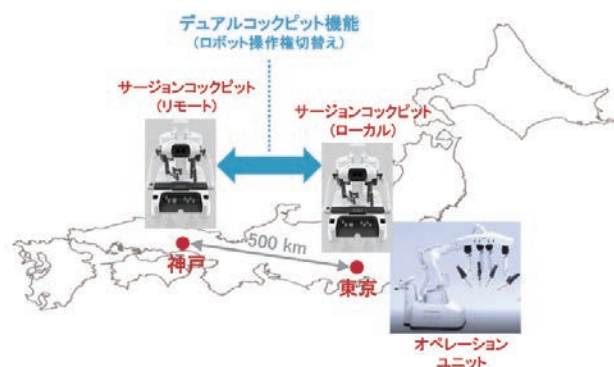
■ 図6. 模擬手術における5Gを介した手術ロボットの遠隔操作模様

側のサージョンコックピットから、商用5Gネットワーク越しに手術室側のオペレーションユニットのロボットアームをスムーズに操作可能であることを確認した。なお、臨床応用が開始されている手術ロボットを用いて、商用5Gネットワークを介した遠隔ロボット操作の実験成功は世界初と考えられる。

4.2 遠距離実証実験

2023年1月、地方の若手医師が執刀するロボット手術を、都市部の熟練医師が遠隔支援することを想定した遠距離の2拠点間における実証実験を実施した。商用5Gネットワークは新たにSA構成を適用し、東京と神戸間の約500km離れた拠点間での遠隔ロボット手術支援の遠距離実証実験に国内で初めて成功した^[7]。

本実証のシステム構成 (図7) では、東京の「赤坂インターシティコンファレンス」に手術ロボットのオペレーションユニット及びサージョンコックピット (ローカル) を設置し、神戸のMeDIPにサージョンコックピット (リモート) を設置した上で、拠点間をドコモの商用5Gネットワーク及びクラウド基盤で接続した。また、2つのサージョンコックピットのロボット操作権を随時切替えることのできるデュアルコックピット機



■ 図7. 遠距離拠点間における5G遠隔ロボット手術支援の実証システム構成

能を新たに開発し、導入した。同機能は、離れた2拠点間で術野映像を共有し、音声コミュニケーションを行いながら、手術ロボットの操作権を状況に応じて切り替え可能とするもので、遠隔ロボット手術支援において必須の機能である。

図8に、実際の遠距離実証実験の様態を示す。右側の東京の拠点において手術ロボットを操作している外科医が、左側の神戸の拠点にいる別の医師による遠隔支援を受けながら模擬手術を進めている。本実験により、約500キロメートルの遠距離を高精度手術映像と音声リアルタイムに伝送することで、東京側の医師が行うロボット手術の状況を神戸側の医師が常時把握し、難しい処置が必要な手術シーンになったとき、神戸側の医師にロボットの操作権をスムーズに切り替えて手術を続行可能であることを示せた。



■ 図8. 遠距離拠点間における5G遠隔ロボット操作実証実験の様態

5. おわりに

今回紹介した5G遠隔ロボット手術支援ソリューションの実現に向けた取組みについては、引き続き臨床利用を想定した技術や機能の開発とその実証、遠隔ロボット手術トレーニングの検証、法的な問題点の整理や医療機器としての認可に向けた準備などをパートナーと連携して取り組んでいく

予定である。

また、本ソリューションを含め、低コストで高速通信を様々な環境で提供できる商用5Gネットワークを応用する遠隔医療ソリューションは、国内においては5Gサービスエリアの急速な拡大に伴って、より広い地域において早期の社会実装が期待される。一方、上述したITU-Dのワークショップでは、海外からの参加メンバから、医療資源が不足している自国の医療問題解決への貢献とともに、次世代通信ネットワークの整備を進める理由の一つになることへの期待も聞かれた。

なお、遠隔医療システムの拠点間を接続する通信ネットワークについては、図3に示すように、次世代ネットワークの5G Evolution and 6G powered by IOWN (Innovative Optical and Wireless Network)^[8]を今後段階的に導入することにより、超高速・超低遅延・超高信頼な情報のやり取りを前提とした更に高度な遠隔医療へ発展することが見込まれる。

参考文献

- [1] 奥村 幸彦, “「医療」×「5G」,” 本誌, vol.49, no.4, pp.25-31, Apr. 2019.
- [2] ITU-D SG2, “Telecommunications/information and communication technologies for e-health: Output Report on ITU-D Question 2/2 for the study period 2018-2021,” pp.12-15, 2021.
- [3] ITU-D SG2, “Telecommunication/ICTs for pandemics and suicide prevention: Annual deliverable 2020-2021 on ITU-D Question 2/2 for the study period 2018-2021,” pp.8-13, 2021.
- [4] メディカロイド, “リリース: 国産初、手術支援ロボットシステム「hinotori™サージカルロボットシステム」が製造販売承認を取得,” 2020年8月11日.
- [5] 神戸大学, “お知らせ: 国産初の手術支援ロボット「hinotori」1例目の手術が無事終了,” 2020年12月17日.
- [6] 神戸大学, ドコモ, メディカロイド, 神戸市, “報道発表: 世界初、商用5Gを介した国産手術支援ロボットの遠隔操作実証実験を開始～次世代通信ネットワークを用いた遠隔ロボット手術の実現に向け産官学が連携して実証実験施設を立ち上げ～,” 2021年4月16日.
- [7] 神戸大学, ドコモ, NTT Com, メディカロイド, 神戸市, “報道発表: 東京-神戸間(約500km)で商用の5G SAを活用し遠隔地からロボット手術を支援する実証実験に成功,” 2023年2月1日.
- [8] ドコモ, “ホワイトペーパー: 5Gの高度化と6G,” 5.0版, 2022年11月16日.