

「医療の均てん化」を目指した
新しい遠隔医療ネットワークの研究開発

—衛星インターネットを用いた離島僻地向け遠隔医療支援—

平成 20 年度報告書

旭川医科大学

【 目 次 】

はじめに.....	3
1 研究開発の概要.....	4
2 実験設備.....	5
2.1 ネットワーク構成.....	5
2.1.1 市立稚内病院・道立紋別病院・遠軽厚生病院との通信環境.....	5
2.1.2 利尻島国保中央病院との通信環境.....	6
2.1.3 道立香深診療所との通信環境.....	7
2.1.4 通信回線仕様.....	8
2.2 遠隔医療支援システム.....	9
2.2.1 全体構成.....	9
2.2.2 サーバ.....	10
2.2.3 クライアント端末.....	10
3 衛星通信時における画像・音声の品質保証に関する研究.....	15
3.1 動画像の品質評価.....	15
3.1.1 眼科医療動画像の選定.....	16
3.1.2 評価動画像の作成.....	19
3.1.3 客観評価実験.....	28
3.1.4 主観評価実験.....	31
3.1.5 考察.....	36
3.2 音声の品質評価.....	37
3.2.1 客観評価実験.....	37
3.2.2 主観評価実験.....	40
3.2.3 考察.....	44
3.3 伝送品質の保証方法に関する考察.....	45
3.4 まとめ.....	46
4 衛星通信の伝送遅延低減方法に関する研究.....	47
4.1 衛星通信による伝送遅延の発生原理.....	48
4.2 アプリケーション間における伝送遅延時間の測定.....	49
4.2.1 測定方法.....	49
4.2.2 測定結果.....	53
4.2.3 考察.....	53

4.3	遠隔医療支援における伝送遅延の影響度評価.....	55
4.3.1	評価方法.....	55
4.3.2	評価結果.....	59
4.3.3	考察.....	60
4.4	2HOP環境に限定した伝送遅延低減方法の検討.....	61
4.4.1	TV会議機能における2回線併用方式の提案.....	61
4.4.2	客観的評価に基づく有効性の検証.....	64
4.4.3	主観的評価に基づく有効性の検証.....	66
4.5	まとめ.....	67
5	研究開発のまとめ.....	68
5.1	平成19年度の研究開発成果.....	68
5.2	平成20年度の研究開発成果.....	68
	おわりに.....	70
	参考文献.....	71
	外部発表実績.....	73

はじめに

今日、離島や僻地では医師の引き揚げが重大な問題となっており、専門医の量的・質的不足は日々深刻さを増している。このような医師の偏在化傾向は、今後、益々強まることが予想されるため、ICT を活用した「遠隔医療」による新しい「医療格差の解消策」に大きな期待が持たれている。遠隔医療を行うには、高品質な音声や映像をリアルタイムで送受信できるブロードバンド環境が必須となるが、遠隔医療支援を求める離島や僻地などの医療過疎地域は、DSL(Digital Subscriber Line)や光ファイバなどの高速な通信回線が整備されていない、いわゆるデジタルデバイド地域であることが多い。現に、北海道内に約 300 ある公立診療所のうちの 8 割は離島・僻地に存在しているが、そのほとんどは DSL も光ファイバも利用できず、それらの通信サービスが開始される見通しも立っていない。こうした状況を考慮すると、有線系のブロードバンドが整備されていない地域に関しては、長距離無線 LAN や衛星通信などの無線系の通信回線を介してインターネットに接続できる環境が必要と考える。長距離無線 LAN は、一旦設備を導入すればその後の費用はほとんどかからないため、衛星通信に比べて低コストで運用できるという利点を持っている。ただし、電波の到達距離には限界があり、また指向性も強いことから、地理的条件によっては利用できないこともある。一方の衛星通信は、長距離無線 LAN に比べて運用コストが高くなるものの、設備の設置に際して地理的な制約が少なく、衛星アンテナを設置できればどこからでもインターネット接続が可能となる。以上のことから、医療の均てん化を図るという観点においては衛星通信が適しており、離島や僻地の医療施設が衛星通信を介してインターネットに接続する「衛星インターネット」環境の構築が現実的な対応であると言える。しかしながら、理論上は衛星通信のカバーエリア内にいる第三者が自由に通信を傍受できることから、情報保護に厳しい医療情報を流通させる際には十分なセキュリティ対策が必要となる。また、衛星回線は有線系の高速回線に比べて伝送速度が遅いため、遠隔医療で要求される画像や音声の品質を保証できるシステムも必要となる。さらに、衛星区間で発生する伝送遅延を緩和することも双方向性を追求する遠隔医療には重要な課題である。そこで本学では、衛星インターネットによる安全かつ効果的な遠隔医療ネットワークの構築を目指し、衛星通信を遠隔医療で利用する際の課題となる①セキュリティ対策、②画像・音声品質の保証、③伝送遅延対策について、平成 19 年度からの 2 ヶ年計画で研究開発を進めてきた。

本報告書では、平成 20 年度において重点的に実施した②画像・音声品質の保証、および③伝送遅延対策に関する研究開発成果について述べる。

1 研究開発の概要

衛星回線とインターネット網を併用する衛星インターネットは、有線系のブロードバンドが整備されていない地域との間で遠隔医療を行うための有効な通信インフラとなる。しかし、理論上は衛星通信のカバーエリア内にいる第三者が通信を傍受することもできるため、厳格な情報保護が要求される医療分野においてはセキュリティ対策が最重要課題となる。一方、本学が平成 18 年度に実施した国内初の衛星インターネットによる遠隔医療実験^{1, 2)}では、衛星回線の伝送速度が不十分であるために遠隔医療で要求される画像・音声の品質を保証できないという知見を得ている。そのため、実用品質が保証できるような遠隔医療システムの構築も必要となる。また、衛星通信時に生じる伝送遅延の緩和、あるいは遅延による影響が少なくなるような工夫も、双方向性を追求する遠隔医療にとって重要な課題となる。このように、衛星インターネットを用いて安全かつ効果的な遠隔医療を実施するためには、①セキュリティ対策、②画像・音声品質の保証、③伝送遅延対策に関する課題を解決しなければならない。そこで本研究では、平成 19 年度からの 2 ヶ年計画で課題解決に向けた研究開発を実施してきた。

平成 19 年度は、衛星インターネットによる遠隔医療ネットワーク環境の構築ならびに課題①のセキュリティ対策に関する研究開発を行った。セキュリティ対策では、モバイル網が衛星回線に比べて安全性が高いことに着目し、携帯電話を利用者認証に用いる新しいセキュリティ方式を確立した³⁾。さらに、同方式を採用したモデルシステムとして診療情報閲覧システムを開発し、利用者の資格に応じて電子カルテの開示範囲を制御する仕組みや、非接触型 IC カード技術である FeliCa⁴⁾を利用した再認証機構も提案した。これらの有効性を、医療従事者を評価者とする主観評価実験で評価し、7 割以上の医療従事者から有効な方式であるとの評価を得ることができた³⁾。以上の成果により、正当性が証明された特定の利用者が安心して衛星インターネットを利用できる環境が構築できた。

平成 20 年度は、前年度に構築した衛星インターネット環境と本学が従来から使用している遠隔医療支援システムを用い、残りの課題である②画像・音声品質の保証、ならびに③伝送遅延対策について研究・開発を行った。以降では、遠隔医療ネットワークの構成および遠隔医療支援システムの仕様を示すとともに、それらを用いて実施した研究内容と成果について報告する。

2 実験設備

本項では、平成 19 年度に構築した遠隔医療ネットワーク環境と、平成 20 年度の研究開発および評価実験で使用した遠隔医療支援システムの仕様について述べる。

2.1 ネットワーク構成

本学遠隔医療センター(以降、遠隔医療センターと呼ぶ)と北海道内の離島・僻地に存在する 5 医療施設(図 2.1)を通信ネットワークで接続するため、スカパーJSAT(株)⁵⁾が提供する衛星インターネットサービスを利用して図 2.2 のような環境を構築した。なお、衛星通信の有効性を比較検証するため、無線系の通信回線である長距離無線 LAN を用いた通信経路も用意した。以降では、遠隔医療センターと各医療施設を接続する通信環境について詳述する。

2.1.1 市立稚内病院・道立紋別病院・遠軽厚生病院との通信環境

遠隔医療センターと市立稚内病院、道立紋別病院、遠軽厚生病院の 3 医療施設間で通信を行う際は、衛星回線のみを使用する方法と、衛星回線と有線回線(B フレッツ)を併用する方法の 2 通りから任意に選択できるようにした。前者は、図 2.3(a)に示すように遠隔医療センターに衛星通信用の移動局を設置し、JSAT 横浜衛星管制センターを経由して固定局を持つ各医療施設との通信を行う 2HOP 環境である。後者は、図 2.3(b)に示すように JSAT 横浜衛星管制センターと遠隔医療センター間を有線回線で、JSAT 横浜衛星管制センターと各医療施設との間を衛星回線で通信する 1HOP 環境である。

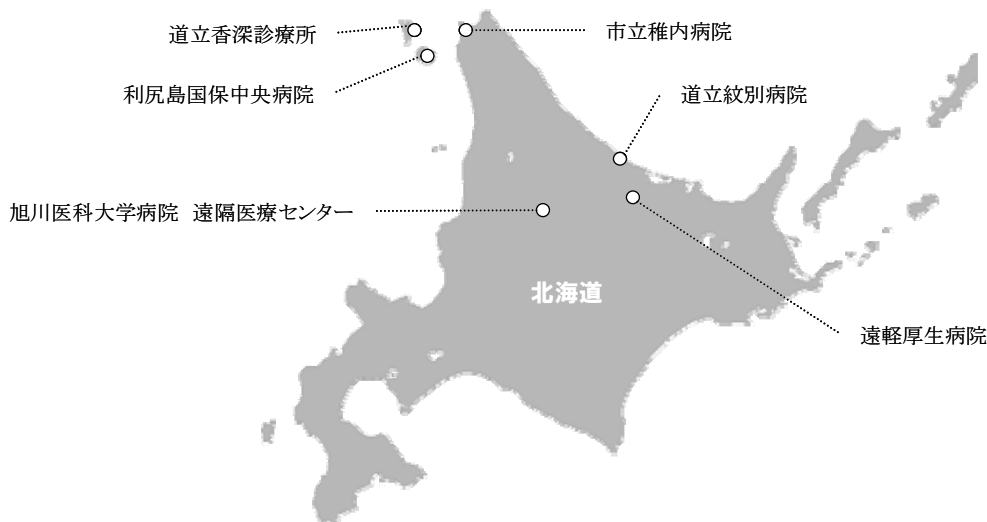


図 2.1 遠隔医療ネットワークの接続拠点

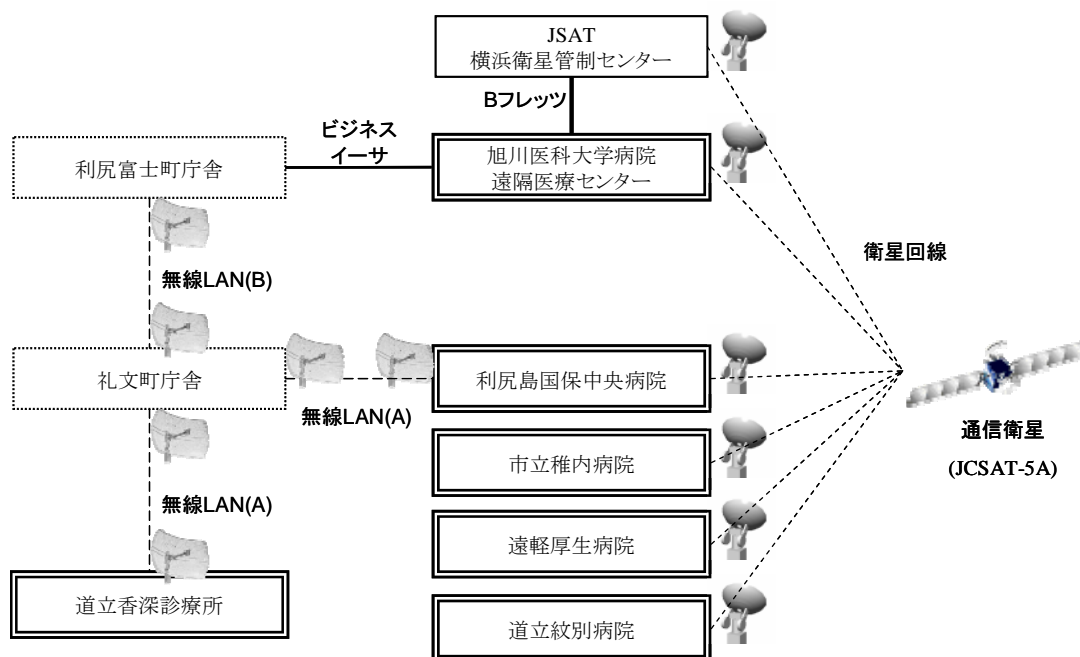


図 2.2 衛星インターネットと長距離無線 LAN を併用した遠隔医療ネットワーク

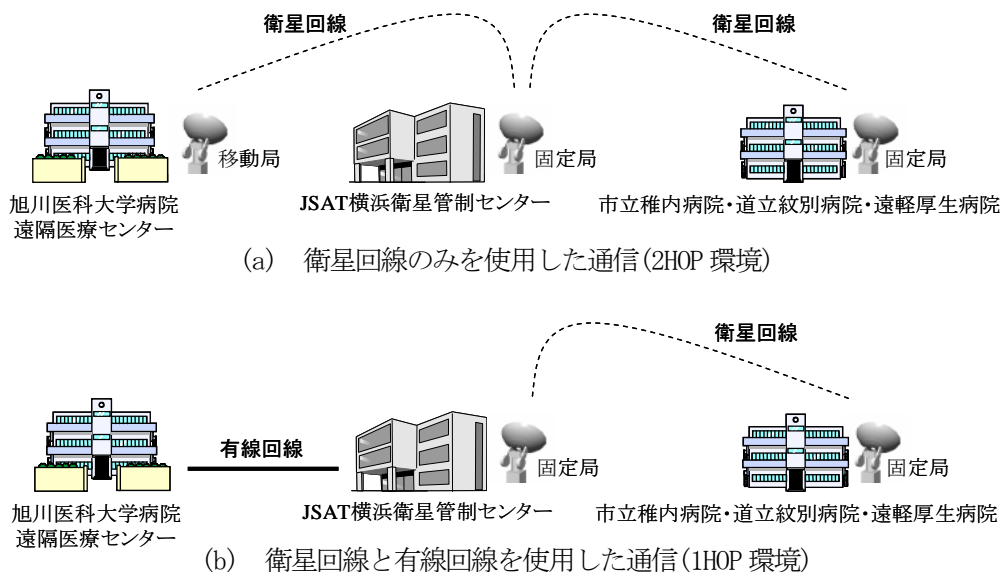


図 2.3 遠隔医療センターと市立稚内病院・道立紋別病院・遠軽厚生病院との通信方法

2.1.2 利尻島国保中央病院との通信環境

遠隔医療センターと利尻島国保中央病院との間で通信を行う際は、長距離無線 LAN とビジネス・イーサを併用する方法と、衛星回線を使用する方法の 2 通りから選択できるようにした。前者は、

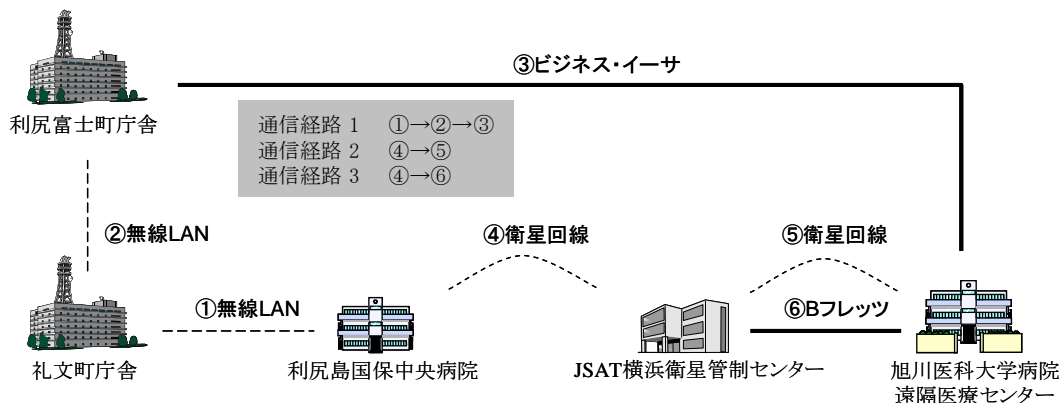


図 2.4 遠隔医療センターと利尻島国保中央病院との通信方法

利尻島国保中央病院から利尻富士町庁舎までを長距離無線 LAN で通信し、そこから遠隔医療センターまでをビジネス・イーサで通信する方法である。ただし、利尻島国保中央病院から利尻富士町庁舎までの距離が長距離無線 LAN の通信可能距離を超えていたため、中間地点にある礼文町庁舎を経由して通信するようにした。後者は、利尻島国保中央病院から遠隔医療センターまでを衛星回線で通信する方法である。この場合、衛星通信を主とする他の医療施設と同様に、図 2.3 で示した 1HOP 環境と 2HOP 環境の 2 通りが選択可能であるため、利尻島国保中央病院と遠隔医療センターを接続する通信経路は図 2.4 で示すように 3 通りとなる。

2.1.3 道立香深診療所との通信環境

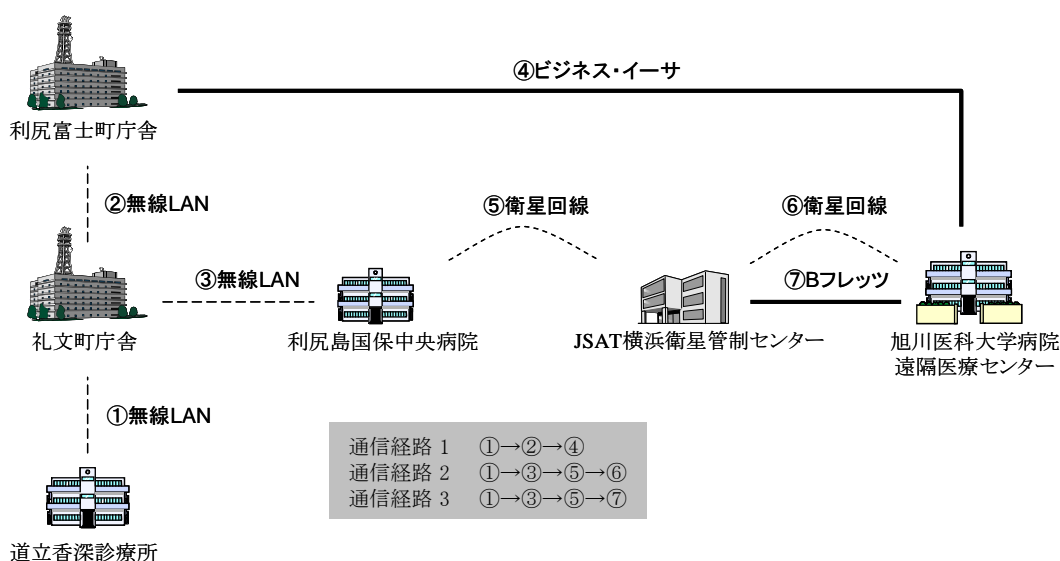


図 2.5 遠隔医療センターと道立香深診療所間との通信方法

表 2.1 通信回線仕様

通信回線	種別	事業者	帯域 (最大値)		備考
			上り	下り	
衛星回線	無線	JSAT	2 Mbps	10 Mbps	旭川医大は移動局、その他は固定局
無線LAN(A) (2.4GHz帯)	無線		54 Mbps		
無線LAN(B) (18GHz帯)	無線		156 Mbps		
ビジネス・イーサタイプE	有線	NTT	4 Mbps		契約 = 4 Mbps / 帯域保証 = 2 Mbps
Bフレッツ	有線	NTT	100 Mbps		

遠隔医療センターと道立香深診療所との間で通信を行う際は、長距離無線 LAN とビジネス・イーサを併用する方法と、長距離無線 LAN と衛星回線を併用する方法の 2 通りから選択できるようにした。前者は、道立香深診療所から利尻富士町庁舎までを長距離無線 LAN で通信し、そこから遠隔医療センターまでをビジネス・イーサで通信する方法である。ただし、長距離無線 LAN については、利尻島国保中央病院と同様の理由により中間地点にある礼文町庁舎を経由して通信するようにした。後者は、道立香深診療所から利尻島国保中央病院までを無線 LAN、利尻島国保中央病院から遠隔医療センターまでを衛星回線で通信する方法である。この場合も、長距離無線 LAN は礼文町庁舎を経由して通信を行った。なお、利尻島国保中央病院と遠隔医療センター間の衛星通信についても、図 2.3 で示した 1HOP 環境と 2HOP 環境の 2 通りが選択可能であるため、道立香深診療所と遠隔医療センターを接続する通信経路は図 2.5 で示すように 3 通りとなる。

2.1.4 通信回線仕様

図2.2の遠隔医療ネットワーク構成図で示した各通信回線の仕様を表2.1に示す。表記した帯域は、各回線において理論的に利用可能な最大値であり、実効帯域はそれよりも狭くなる。なお、衛星回線ならびに B フレッツは、同じ回線を複数のユーザで共有するベストエフォート(帯域非保証型)回線である。

2.2 遠隔医療支援システム

平成 20 年度は、衛星回線を利用して送受信される動画像や音声の品質保証と、衛星区間で発生する伝送遅延の対策方法、の 2 点を重点課題として取り上げたが、このような衛星通信に特有の課題を解決するためには、DSL や光ファイバ等の有線回線を用いた従来の遠隔医療で要求される品質条件と比較し、その結果を考慮して対策方法を検討することが重要となる。また、実用化を目的とする場合、実験用としての特別な環境を用意するよりも、実際の遠隔医療支援で活用されている環境や設備を用いた方が、より現実的な遠隔医療支援環境を構築できると考える。以上のような理由から、本学眼科が従来から遠隔医療に利用してきた遠隔医療支援システムを用いて衛星通信に関する各課題の解決を試みた。このシステムは、DSL や光ファイバの利用を前提とした IP 通信環境で動作し、TV 会議による医師同士のカンファレンスを主な用途として開発されたものである。また、クライアント・サーバ型と Peer to Peer 型の性格を合わせ持った構成をしており、利用する機能に応じて形態を使い分けるといった特徴を持っている。以降では、本研究が各種実験で使用した遠隔医療支援システムの構成と、機能および性能について詳述する。

2.2.1 全体構成

遠隔医療支援システムの全体構成を図 2.6 に示す。遠隔医療センターには、各医療施設で登録された患者情報や検査画像などを共有するためのサーバと、TV 会議を主な機能とするクライア

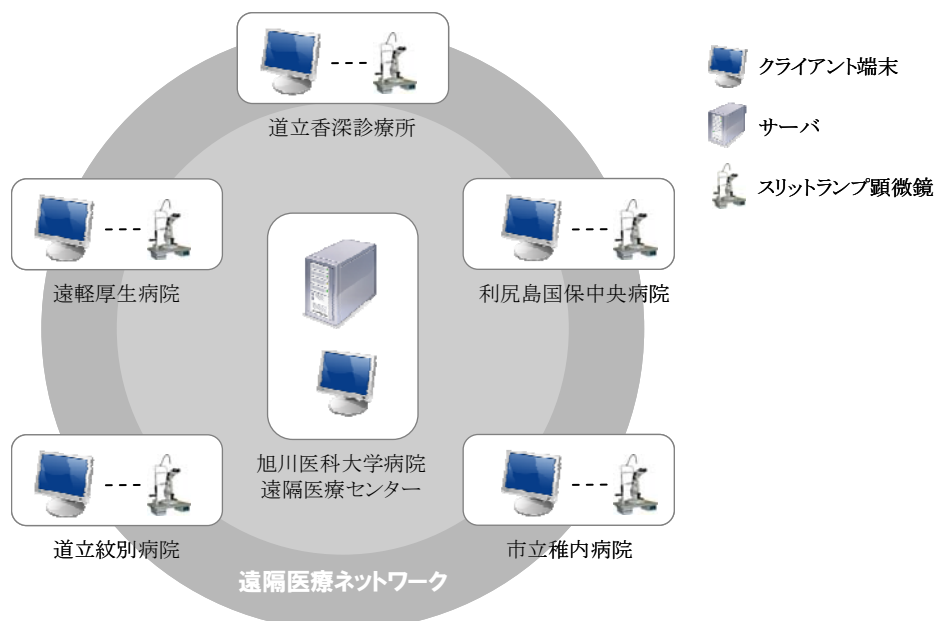


図 2.6 遠隔医療支援システムの全体構成

ント端末を設置した。その他の医療施設については、遠隔医療センターに設置したものと同機種のクライアント端末と CCD カメラを装着した眼科用の検査顕微鏡(以降、スリットランプ顕微鏡と呼ぶ)を併設し、同顕微鏡によって医師が観察する患者の眼球像を、TV 会議機能を用いてリアルタイム動画として伝送できる環境を構築した。なお、各施設間を VPN で接続することにより、データ通信時における安全性を確保した。

2.2.2 サーバ

遠隔医療支援システムは、VPN で構築する遠隔医療ネットワークに 1 台以上のサーバが接続されていることを前提に動作する。サーバには、患者情報データベースと画像データベースが実装されており、検査機器等で撮影される 15 万枚以上の画像を 1 台のサーバに登録することができる。登録した画像および患者情報は、正当性が証明されたユーザであればいつでもクライアント端末から参照することができる。

2.2.3 クライアント端末

クライアント端末は、遠隔医療支援にとって必須となる TV 会議機能と医療情報の共有機能を兼ね備えており、ユーザである医療従事者が操作しやすいユーザインタフェースで開発されている。具体的な機能および仕様は以下の通りである。

(1) ハードウェア構成

クライアント端末のハードウェア構成を図 2.7 に示す。端末のディスプレイは、操作性を重視してペンタッチディスプレイを採用しており、ユーザである医師がタッチペンを使用してボタンクリックや図形描画などの操作を簡単に行えるよう設計されている。また、TV 会議のための CCD カメラ(有効画素数 38 万画素)を端末本体に装着しているため、本体の電源を入れるだけで TV 会議機能を利用することができる。なお、クライアント端末本体は市販の PC を使用しており、機能の大半



図 2.7 クライアント端末のハードウェア構成

をソフトウェアで実現していることから、ハードウェアCODECを主体とするTV会議システムに比べて低コストで導入することができ、機能強化や機能追加などにも柔軟に対応できるという利点を持っている。

(2) 主な機能

図2.8に示す画面イメージに基づいて、クライアント端末の主な機能を紹介する。図中Aの患者情報表示エリアは、診断支援の対象となる患者の情報を表示する領域であり、支援側と支援依頼側の双方で同じ内容が表示される。DおよびEのサブモニタ①②は、CCDカメラで撮影されたTV会議映像を表示する領域であり、D(①)は自端末側で撮影された映像を、E(②)は相手端末側から送信された映像をそれぞれの端末で出力する。このときの通信形態は、端末間で直接送受信するPeer to Peer型となる。Cのサムネイル画像表示エリアは、該当患者の検査画像情報などをサムネイル画像として列挙する領域であり、クライアント・サーバ型の通信形態によって該当患者に関する全ての画像のサムネイル画像をサーバからダウンロードする。ただし、端末間で情報共有を行うため、一方の端末がサムネイル画像をダウンロードすると同時にもう一方の端末でも自動的にサムネイル画像のダウンロードが開始される仕組みとなっている。Bは、TV会議時におけるメインモニタとして使用する領域であり、サブモニタ(D、E)に表示されるTV会議映像とサムネイル画像表示エリア(C)に表示される1つ以上のサムネイル画像のうち、ユーザ自身が選択するものを1つだけ表示する。表示内容の選択は、その対象領域をユーザがタッチペンで指定することによって行う。このとき、サブモニタが選択された場合は画像解像度をメインモニタのサイズに合うよう調整し、サムネイル画像が選択された時はその原画像をサーバからダウンロードした後にサイズ調整を行う。なお、図2.9で示すようにメインモニタで画像データを表示している時は画像描画機能が



図 2.8 クライアント端末の画面イメージ



図 2.9 画像描画機能によって画像中の患部にマーキングを行っている様子

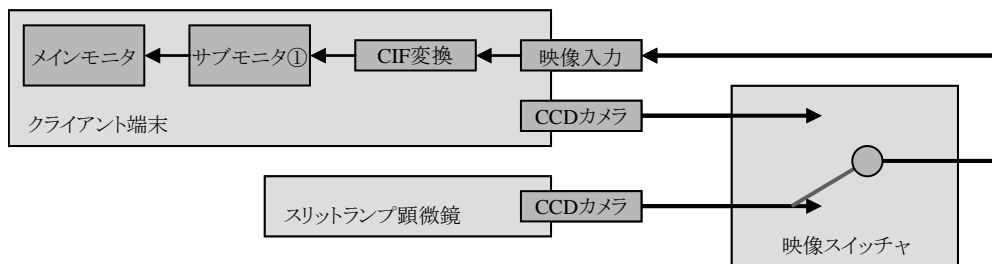


図 2.10 CCD カメラ映像の切り替え方法

利用できる。これは、タッチペンを用いて画像中の患部をマーキングしたり、任意の図形や文字を描画することができ、その情報を相手の医師と共有しながら TV 会議を行うことができる。

(3) CCDカメラ映像の入出力

CCD カメラで撮影された映像信号の流れを図 2.10 に示す。サブモニタ①(図 2.8 の D)およびメインモニタ(図 2.8 の B)では、クライアント端末本体の CCD カメラ映像とスリットランプ顕微鏡に装着されている CCD カメラの映像を、映像スイッチャで切り替えながら交互に表示する。映像スイッチャは、NTSC(アナログ)信号を出力する CCD カメラに対応したものであり、その仕様であれば眼科のみならず様々な診療科の医療用機器と接続することができる。なお、映像信号を入力したクライアント端末は、画像解像度を NTSC(720×480 画素)から CIF(352×240 画素)に変換した上で各画

面に表示する。

(4) 動画像の符号化伝送方式

TV 会議機能では、動画像の符号化に H.264 / MPEG-4 AVC^[6,7](以降、H.264 と呼ぶ)を採用している。H.264 は、低解像度・低ビットレートの動画像から HDTV のような高解像度・高ビットレートの動画像まで、幅広い分野のアプリケーションに対応できる標準的な動画像符号化方式であり、MPEG-2^[8]や MPEG-4^[9]などの従来方式に比べて約 2 倍の符号化効率を持つことが知られている^[10]。符号化アルゴリズムは、符号化効率を改善するための様々な改良や機能強化がなされているが、基本となる部分については MPEG-2 / 4 で採用されてきた技術をそのまま継承している。その中の一つに、時間方向に隣接するフレーム間の相関が高いことを利用したフレーム間予測符号化と呼ばれるアルゴリズムがあり、H.264 においてもデータ量の大幅な削減に大きく寄与している。

フレーム間予測符号化は、図 2.11 の例で示すように入力される連続フレームを I ピクチャ(Intra - Picture)、P ピクチャ(Predictive - Picture)、B ピクチャ(Bi-directional Predictive - Picture)の 3 種類に分類して符号化する。I ピクチャは、前後のフレームとは関係なく独立した符号化によって得られるピクチャであり、圧縮後のデータ量は P / B ピクチャよりも多くなる。P ピクチャは、フレーム間の順方向予測符号化によって得られるピクチャである。すなわち、過去に存在する I ピクチャもしくは P ピクチャと当該フレームとの差分を用いて符号化が行われる。そのため、I ピクチャに比べて圧縮後のデータ量は少なくなる。B ピクチャは、過去と未来の双方向から予測する方法と、順方向(過去の 2 フレームもしくは未来の 2 フレーム)から予測する方法のいずれかによって得られるピクチャであり、当該フレームよりも過去と未来に存在する I / P ピクチャとの差分を用いて符号化が行われる。B ピクチャは、I / P ピクチャに比べて圧縮後のデータ量が最少となるものの、画質は他のピクチャに比べて最低となる。伝送ビットレートは、I ピクチャから次の I ピクチャまでに含める P / B ピクチャの

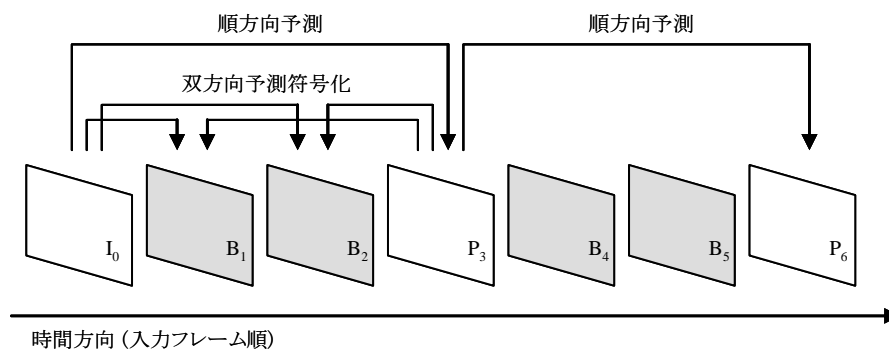


図 2.11 フレーム間予測符号化の概念図

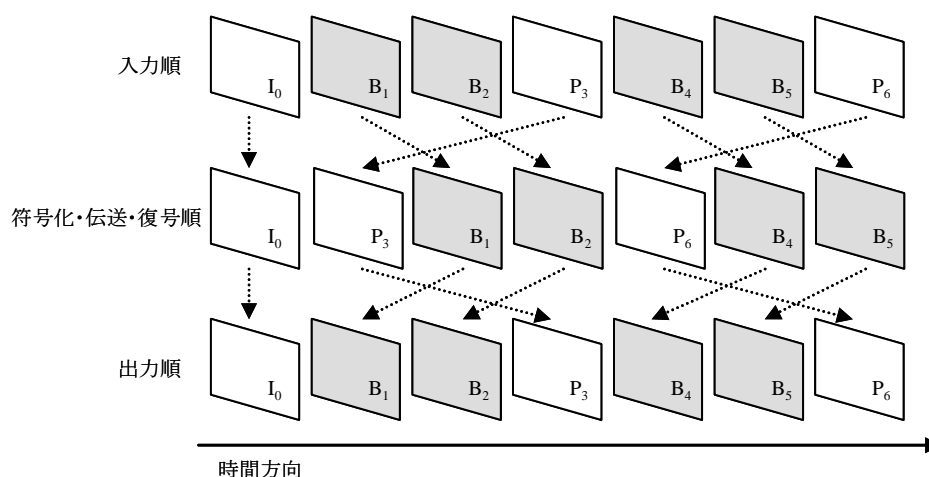


図 2.12 各ピクチャの一般的な処理順番

表 2.2 クライアント端末の仕様および性能

表示モニタ	液晶ペンタタッチディスプレイ	
画面入力	タッチペン/キーボード/マウス	
同時接続拠点数	最大 3 拠点	
映像	カメラ入力信号	NTSC (640×480 画素)、30 frame/sec、フルカラー
	伝送解像度	CIF (352×288 画素)
	画面出力解像度	CIF (352×288 画素)
	伝送フォーマット	H.264 / MPEG-4 AVC : GOP = 20 frame
	伝送フレームレート	30 frame / sec
	伝送ビットレート	200 ~ 2000 kbps の範囲で任意指定
	通信プロトコル	UDP/IP
音声	伝送フォーマット	PCM
	伝送ビットレート	64 kbps 固定
	通信プロトコル	UDP/IP
静止画像	キャプチャ解像度	NTSC (640×480 画素)

数によって調整することができ、B ピクチャを多くするほど低ビットレートで伝送することとなる。なお、図 2.11 では各ピクチャを入力フレーム順に並べて示しているが、双方向予測もしくは未来からの順方向予測によって B ピクチャを得る時は未来の P ピクチャが必要となるため、実際の符号化・伝送・復号の処理順番は図 2.12 のようになる。

遠隔医療支援システムの TV 会議機能では、低ビットレート伝送を実現するために、P ピクチャを使用せずに I ピクチャと B ピクチャのみを伝送しており、B ピクチャは MPEG-2 / 4 と同様に双方向予測によって得ている。また、伝送プロトコルには UDP/IP を用い、図 2.12 の伝送順に従ってピクチャ単位でリアルタイム伝送(30 frame / sec)を行っている。

(5) 仕様および性能

クライアント端末の仕様および性能をまとめて表 2.2 に示す。

3 衛星通信時における画像・音声の品質保証に関する研究

本ネットワークで使用する衛星回線は、表 2.1 で示したように上り方向の最大通信帯域が 2 Mbps、下り方向が 10 Mbps のベストエフォート(帯域非保証型)回線である。この回線を遠隔医療支援システムで使用する場合、動画や音声の双方向通信に利用できる理論上の最大帯域は 2 Mbps となるが、これは、近年の主流となりつつある高速 DSL サービスや光通信サービス等に比べれば決して広帯域な通信回線とは言えず、さらに、IP パケット等のオーバーヘッドを考慮すると、アプリケーション側で利用できる実効帯域はさらに狭くなることが予想される。すなわち、衛星回線を用いる場合は、狭帯域な通信環境下で動画や音声の双方向リアルタイム通信を実現しなければならない。この場合、伝送データの圧縮率を高めることでリアルタイム性を保証することは可能であるが、圧縮率の上昇に伴い伝送品質の劣化が大きくなり、その程度によっては遠隔医療支援が実施困難になる可能性も考えられるため、実用可能な伝送品質の範囲内で圧縮率を調整することが重要となる。また、圧縮率が同一であってもデータの情報量によって品質劣化の程度に差異が生じることから、伝送対象の特徴に応じた圧縮条件の設定も必要となる。そこで本研究では、衛星回線を利用した場合でも遠隔医療支援が可能な品質で伝送できるシステム構築を目指し、客観評価ならびに主観評価に基づく実用可能品質の明確化と、その品質を保証しながら衛星回線の実効帯域内で双方向リアルタイム通信を実現する方法について検討を行った。

3.1 動画像の品質評価

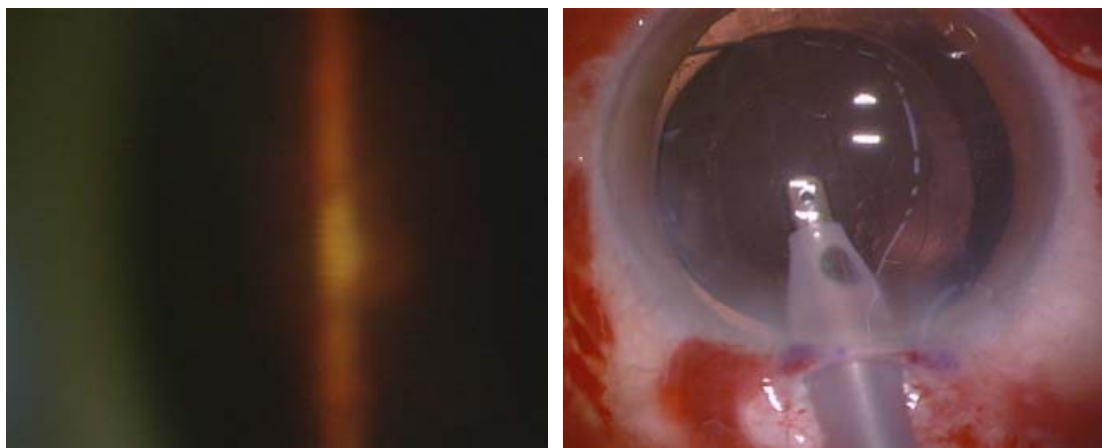
遠隔医療支援では、様々な診療科の医療動画像が伝送対象として扱われるが、その中でも眼科は、画質や色再現性に対する要求が最も厳しい領域の一つであるため、その画像を実用品質で伝送できる符号化・伝送条件を明確にできれば他の診療科へも容易に適用できると考える。そこで本項では、眼科医療動画像を評価対象として、TV 会議機能を用いた際の実用可能品質を明らかにした。なお、伝送ビットレートを制御するための主なパラメータとして、符号化ビットレートと伝送フレームレートの 2 種類が挙げられるが、後者の制御については、眼科のスリットランプ画像に対して有効性が実証されているものの^[1]、他の画像や診療科においても許容されるかどうかは未確認であるため、以降では符号化ビットレートのみを制御の対象とし、伝送フレームレートについては 30 frame/sec 固定で扱うこととした。

3.1.1 眼科医療動画像の選定

まず、旭川医科大学において日常的に撮影・記録されている眼科医療動画像の中から、代表的な場面を4種類選定し、評価の対象とした。

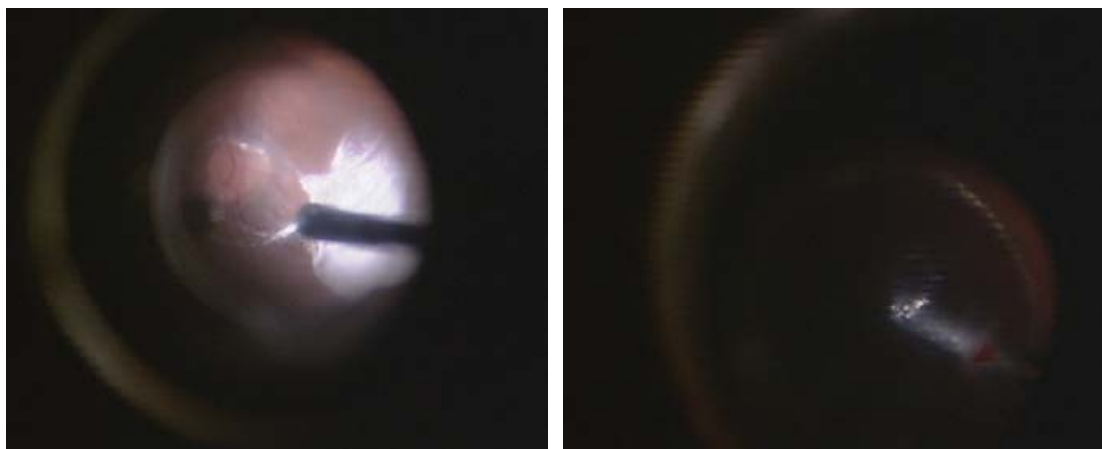
(1) 特徴

評価用として選定した4種類の眼科医療動画像を図3.1に示す。同図(a)は、眼科の診察において日常的に使用されるスリットランプ顕微鏡で撮影された検査画像である。この画像は、室内を消灯した状態で角膜の表面や虹彩にスリット光を照射して撮影されるため、照明光の当たっていない領域が暗黒となる。(b)は、手術顕微鏡に装着したCCDカメラによって術者が観察する患者の眼球表面を撮影した白内障手術画像である。スリットランプ検査画像(同図(a))とは異なり、顕微鏡の



(a) スリットランプ検査画像

(b) 白内障手術画像



(c) 硝子体手術画像1

(d) 硝子体手術画像2

図3.1 評価に用いた眼科医療動画像(RGB各8bit / CIF)

照明や室内照明によって眼球表面全体が明るく撮影されるのが特徴である。(c)および(d)は、(b)と同じ手術顕微鏡によって硝子体手術の様子を撮影した画像である。この画像は、室内を暗室にした状態で眼球内にライトガイドを挿入し、それによって照射した患部を眼球の上から瞳孔を通して撮影される。そのため、画像中の明るい部分は瞳孔の形と同じく円形状であり、患部以外の大半の領域が暗黒となる。これら4種類の動画は、いずれも、R、G、Bそれぞれが8 bitで表現されるフルカラーであり、フレームレートは30 frame / secである。ただし、映像時間は画像によって異なり、(a)(b)が10 sec、(c)が26 sec、(d)が23 secとなる。なお、画像解像度は顕微鏡に装着されたCCDカメラ仕様に依存するが、遠隔医療支援システムで扱える解像度がCIF(352×240画素)であるため、全ての動画をCIFに変換してから評価用の動画を作成した。

(2) 統計的性質

表 3.1 は、図 3.1 で示した眼科医療動画(1 フレーム)の R(赤)、G(緑)、B(青)、Y(輝度)、Cb(色差 1)、Cr(色差 2)成分の平均情報量 H を式 3.1 によって求めた結果である。ただし、 P_i は画素値 i の生起確立である。

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \tag{3.1}$$

また、YCbCr は色空間の一つであり、RGB 色空間における各画素の R、G、B 値を元に式 3.2 ~ 式 3.4 で求めた。

$$Y = 0.29900 \times R + 0.58700 \times G + 0.11400 \times B \tag{3.2}$$

$$Cb = -0.16874 \times R - 0.33126 \times G + 0.50000 \times B \tag{3.3}$$

$$Cr = 0.50000 \times R - 0.41869 \times G - 0.08131 \times B \tag{3.4}$$

平均情報量は、画像中の 1 画素に含まれる単一成分(8 bit 表現)を伝送するために必要な最低

表 3.1 評価画像の平均情報量 (bit/pixel)

	R	G	B	Y	Cb	Cr
スリットランプ検査画像	6.046	5.347	4.443	5.503	4.353	4.081
白内障手術画像	7.008	6.777	7.090	6.753	4.792	5.088
硝子体手術画像1	5.811	5.625	5.654	5.638	3.523	3.393
硝子体手術画像2	4.689	4.322	4.312	4.396	2.945	2.805

ビット量を理論的に表したものであり、この値が小さい画像ほど少ないデータ量で伝送できることを意味する。

風景や映画などの一般的な画像の場合、R、G、B、Y 成分に比べて Cb、Cr 成分の平均情報量は小さくなることが知られているが、眼科医療動画像においても同様の傾向であることが表 3.1 によって示されている。これは、図 3.2 に示した白内障手術画像(図 3.1(b))の濃度分布からわかるように、R、G、B、Y 成分は画素値が広範囲に分布しているのに対し、Cb、Cr 成分については大半の画素値が 0 近傍に集中し、分布範囲が狭くなっていることが要因である。以上のことから、眼科医療動画像については YCbCr 色空間を符号化および伝送の対象とするのが効率的であると言える。なお、遠隔医療支援システムの TV 会議機能で採用している H.264 についても、RGB 色空間から

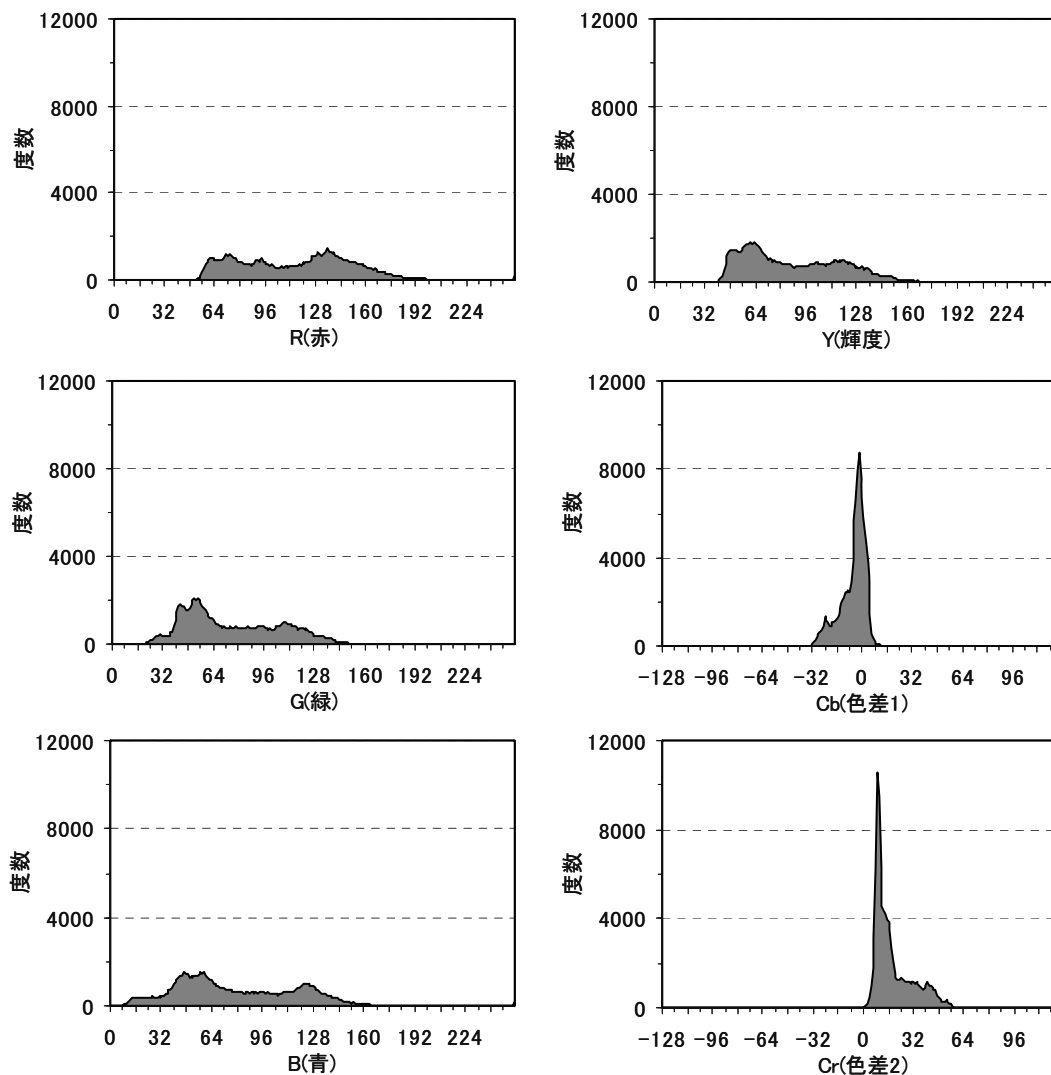


図 3.2 白内障手術画像(図 3.1(b))の濃度分布

YCbCr 色空間に変換することで効率的な動画像符号化を実現している。

一方、平均情報量を画像間で比較すると、全体的に明るい輝度を持つ白内障手術画像は、暗領域を持つスリットランプ検査画像や硝子体手術画像 1、2 に比べて大きくなっていることがわかる。このことから、符号化ビットレートが同一であっても画像の種類によって圧縮率が異なること、また、白内障手術画像は他の画像に比べて画質の劣化度合いが大きくなることが予想される。ただし、平均情報量は可逆符号化後のデータ量を予測するために用いられるものであり、H.264 のような非可逆符号化を行った後のデータ量については平均情報量に基づく予測よりも小さくなることが多い。

3.1.2 評価動画像の作成

後述する客観評価実験および主観評価実験では、利尻島国保中央病院からリアルタイム伝送した 4 種類の眼科医療動画像(図 3.1)を遠隔医療センター側で受信し、それらを映像記録装置で記録・再生したものを評価動画像とした。ただし、通信環境と伝送品質との関係性も調べるために条件が異なる 3 通りの通信経路を使用した。また、符号化ビットレートを段階的に設定することで、同一の動画像から複数の画像品質を持った評価動画像を作成した。作成方法の詳細を以下で述べる。

(1) 装置構成

評価動画像を作成するための装置構成を図 3.3 に示す。送信側の利尻島国保中央病院では、DV フォーマットで記録された眼科医療動画像を DV 再生機で再生し、その出力映像を遠隔医療支援システムへ入力した。入力した動画像は同システムの TV 会議機能を用いて H.264 フォーマットで遠隔医療センターへリアルタイム伝送した。受信側の遠隔医療センターでは、H.264 フォー

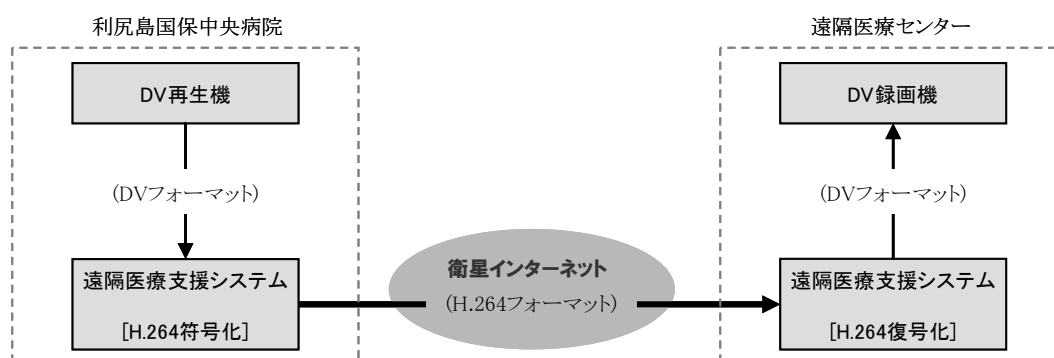


図 3.3 評価画像作成のための装置構成

マットの動画データを遠隔医療支援システムから DV 録画機へ出力し、同機にて DV フォーマットとして記録し直した。

(2) 通信環境

遠隔医療支援システム間の伝送には、通信回線と伝送品質との関係を把握するために図 3.4 で示す 3 通りの通信経路を用いた。通信経路①(同図(a))は、利尻島国保中央病院と遠隔医療センターを衛星回線のみで接続する 2HOP 環境である。この経路の場合、利用できる理論上の最大帯域は衛星回線の上り方向の最大帯域(2 Mbps)となる。通信経路②(同図(b))は、利尻島国保中央病院から JSAT 横浜衛星管制センターまでを衛星回線で接続し、そこから遠隔医療センターまでを IP 網(B フレッツ回線)で接続する 1HOP の環境である。IP 網内では高速通信が期待できるものの、衛星回線を経由するために理論上の最大帯域は通信経路①と同様に 2 Mbps となる。通信経路③(同図(c))は、衛星回線を利用せずに無線 LAN とビジネス・イーサで接続する環境である。この場合、ビジネス・イーサにおける最大帯域が 4 Mbps であるため、実効帯域は通信経路①、②よりも広がる。

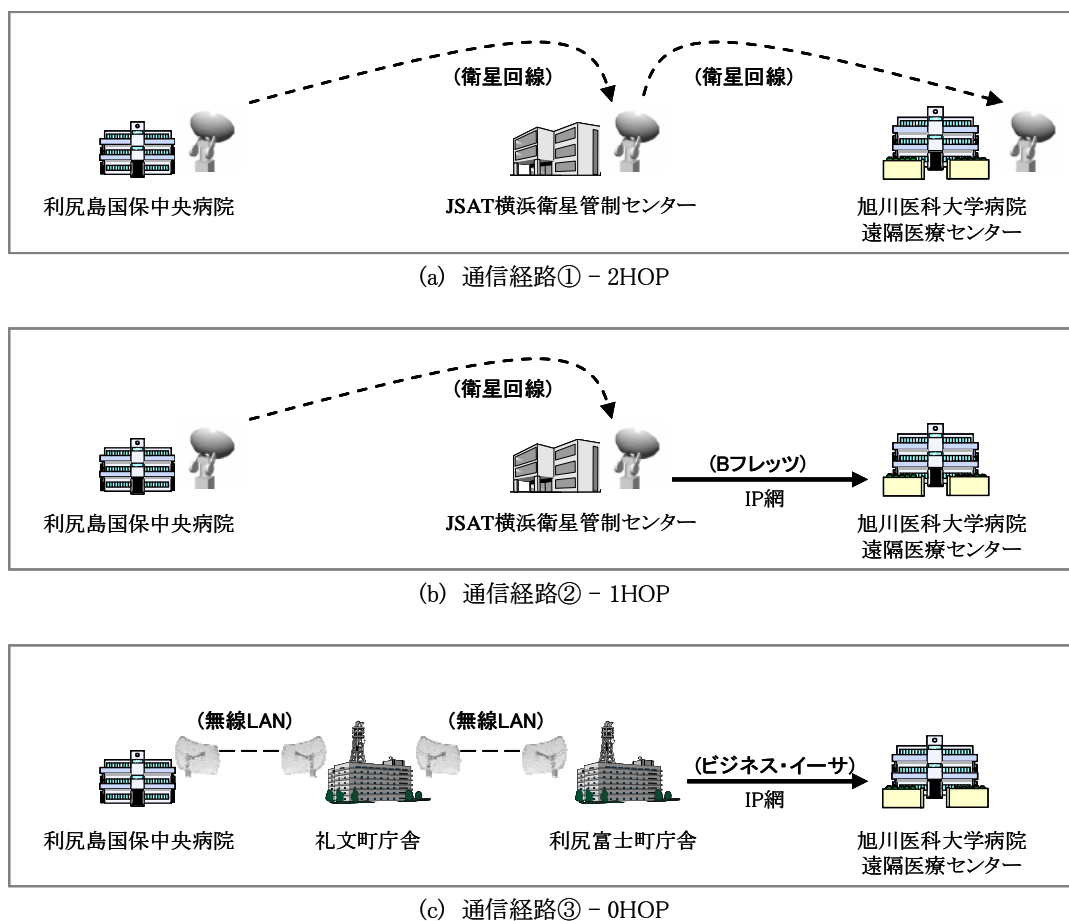


図 3.4 評価動画像の作成に使用した通信環境

(3) 符号化ビットレートの設定

遠隔医療支援システムでは、TV 会議機能で使用している H.264 エンコーダの符号化ビットレートを任意に設定することができる。そこで、符号化ビットレートを段階的に等間隔で設定し、同一の眼科医療動画像から画質の異なる複数の評価動画像を作成した。具体的には、利尻島国保中央病院の遠隔医療支援システムにおいて、符号化ビットレートを 200 kbps から 2000 kbps まで 200 kbps 間隔で設定し、遠隔医療センターの同システムによって 10 段階の画質を持った眼科医療動画像(各 10 通り)を記録した。ただし、先でも述べたように本研究ではフレームレートを 30 frame / sec 固定で扱うことを前提としているため、帯域不足等によってフレームレートの低下が確認されたものについては評価の対象外とした。その可否を調べたのが表 3.2 である。同表は、設定した符号化ビットレートで伝送した際に 30 frame / sec で受信できたかどうかを○×で示したものであり、4 種類全ての眼科医療動画像に共通の結果である。この表から、衛星回線を利用する通信経路①、②(図 3.4(a),(b))では 600 kbps を超えた時点でフレームレートが低下し始め、衛星回線を利用しない通信経路③(図 3.4(c))は全ての符号化ビットレートで 30 frame / sec が維持されていることがわかる。よって、以降の実験では、通信経路①、②において評価対象とする最大符号化ビットレートを 600 kbps、通信経路③を 2000 kbps とした。

(4) 受信動画像

利尻島国保中央病院から遠隔医療センターへ 3 通りの通信経路を用いて伝送した全ての評価動画像を図 3.5 から図 3.16 に示す。図中の()内は符号化ビットレートを表している。以降では、これらの評価動画像を用いて画質の客観評価ならびに主観評価を行った。

表 3.2 受信フレームレートに基づく評価可能符号化ビットレートの判定

符号化ビットレート (kbps)	通信経路① 衛星 2HOP	通信経路② 衛星 1HOP	通信経路③ 衛星 0HOP
200	○	○	○
400	○	○	○
600	○	○	○
800	×	×	○
1000	×	×	○
1200	×	×	○
1400	×	×	○
1600	×	×	○
1800	×	×	○
2000	×	×	○

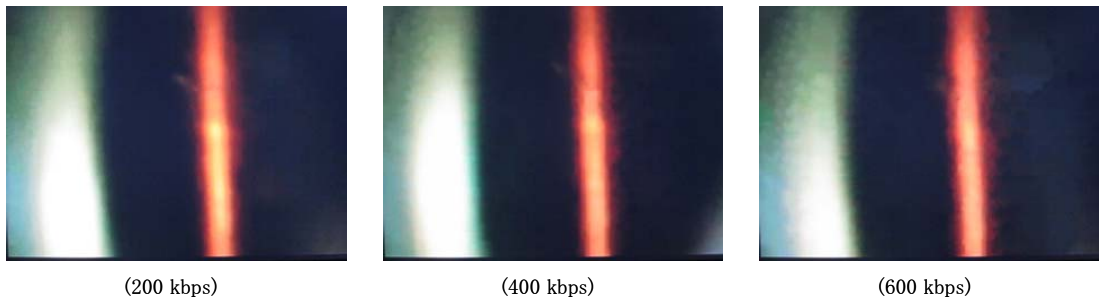


図 3.5 通信経路① - スリットランプ検査画像

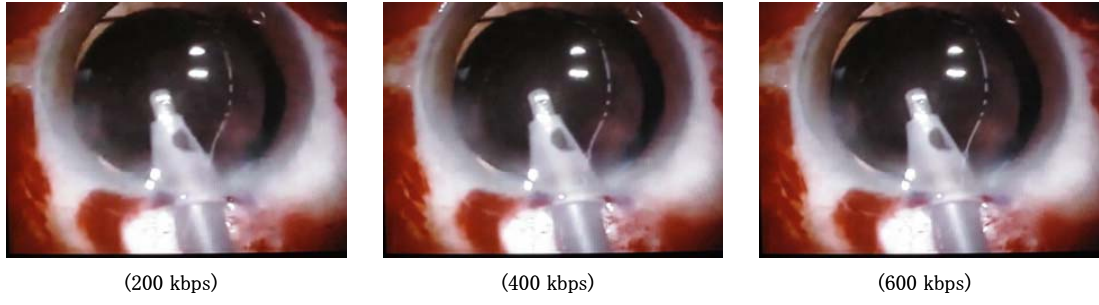


図 3.6 通信経路① - 白内障手術画像

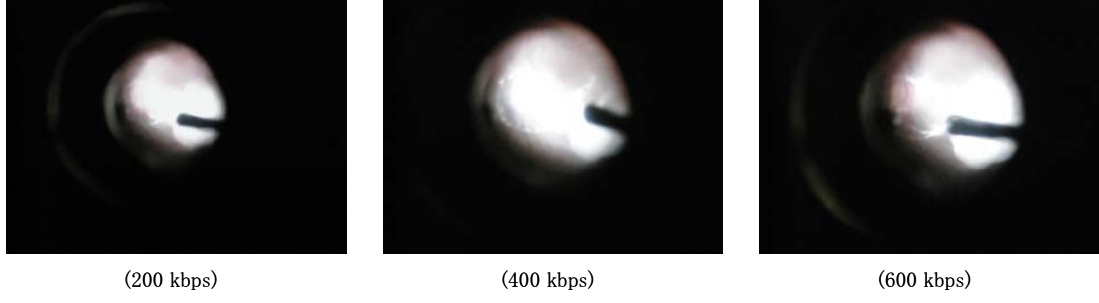


図 3.7 通信経路① - 硝子体手術画像 1

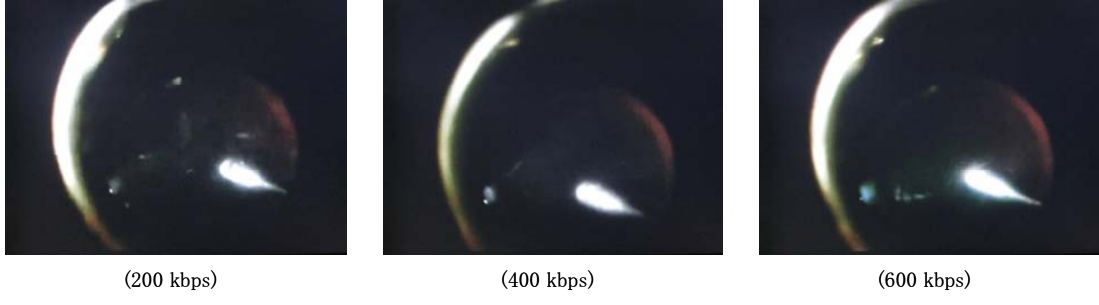


図 3.8 通信経路① - 硝子体手術画像 2

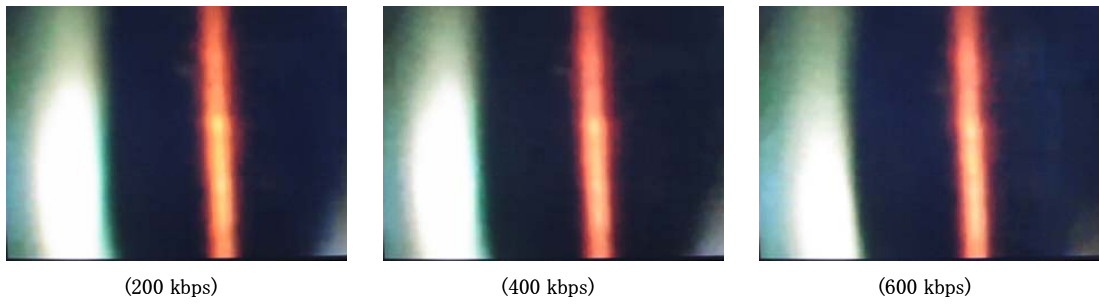


図 3.9 通信経路② - スリットランプ検査画像

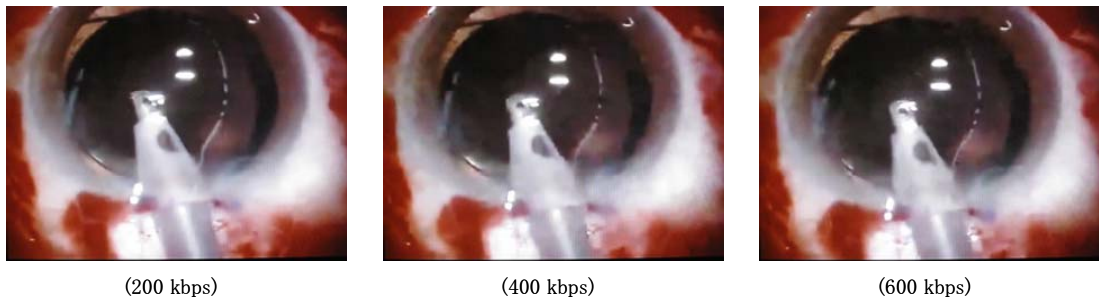


図 3.10 通信経路② - 白内障手術画像

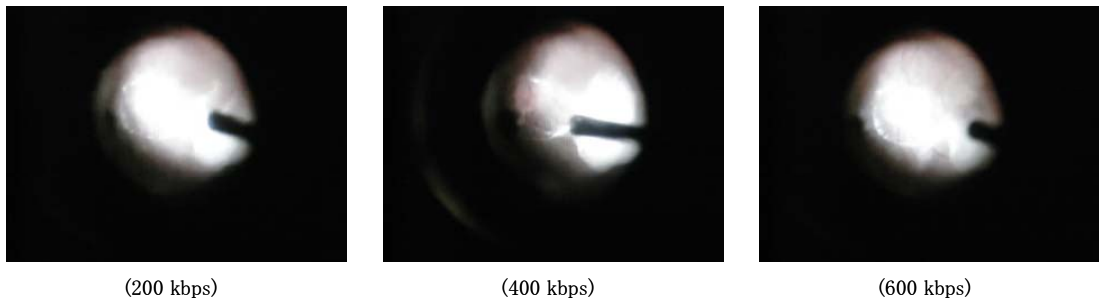


図 3.11 通信経路② - 硝子体手術画像 1

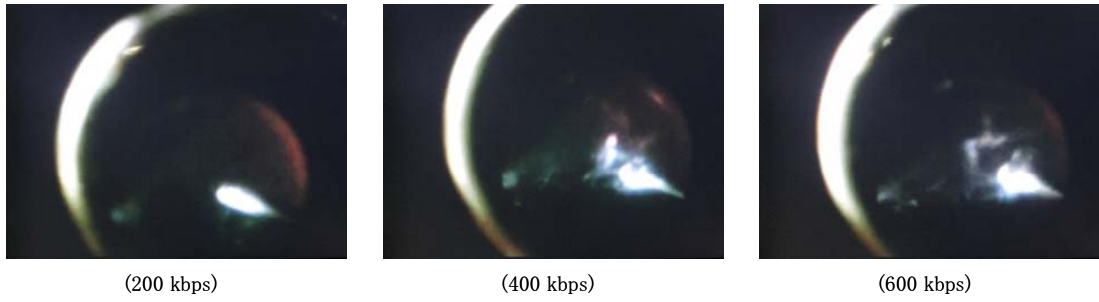


図 3.12 通信経路② - 硝子体手術画像 2

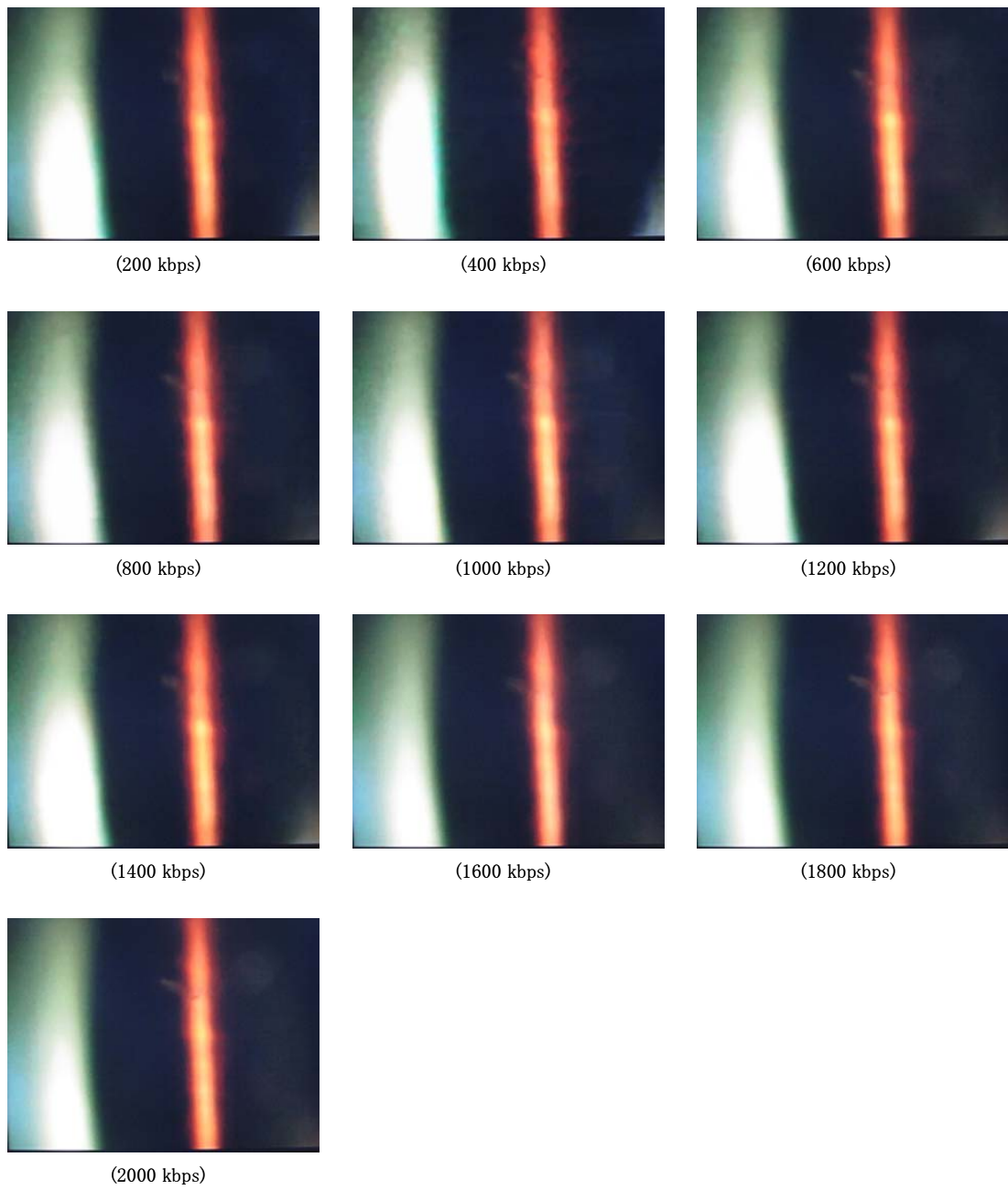


図 3.13 通信経路③ - スリットランプ検査画像

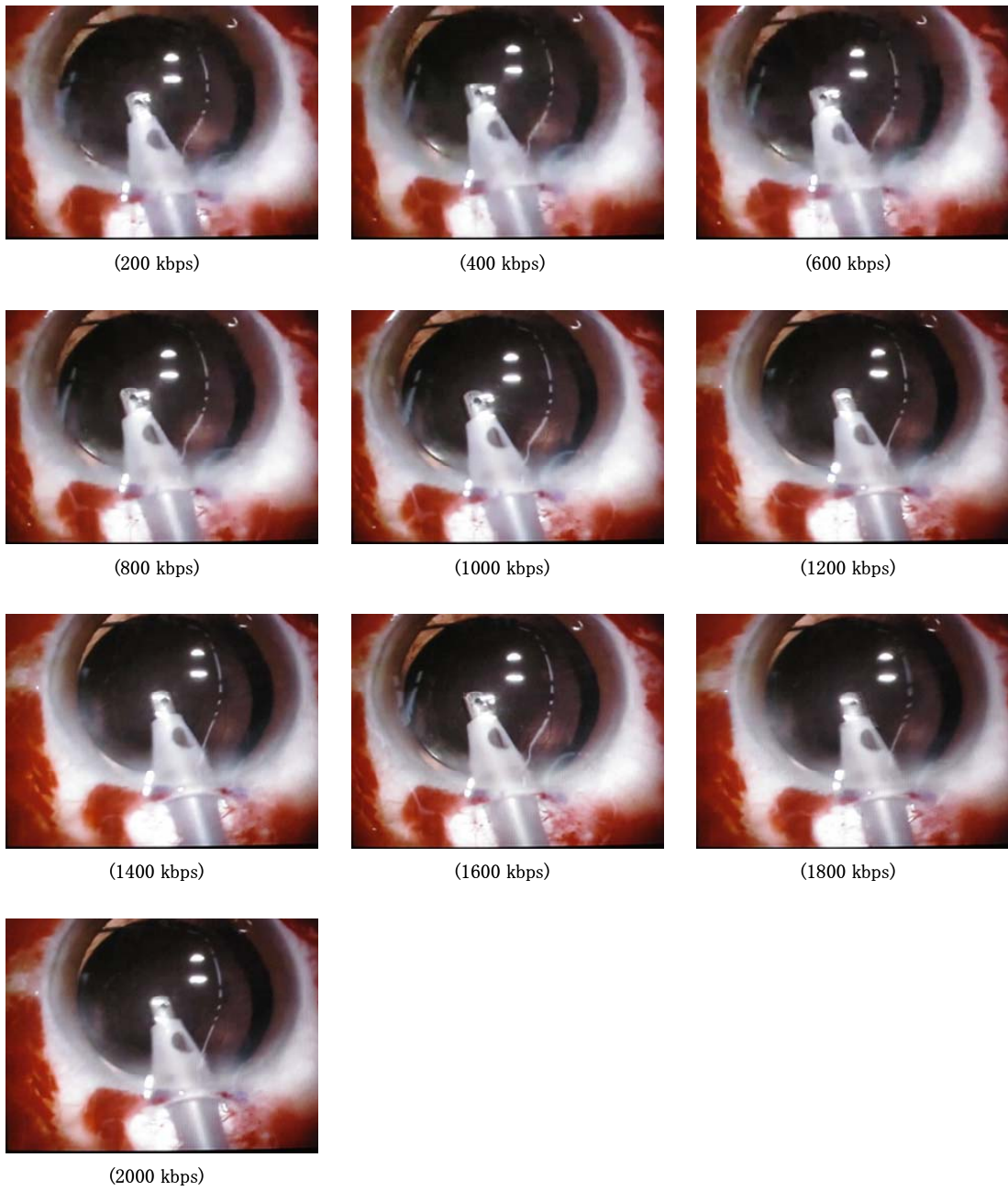


図 3.14 通信経路③ — 白内障手術画像

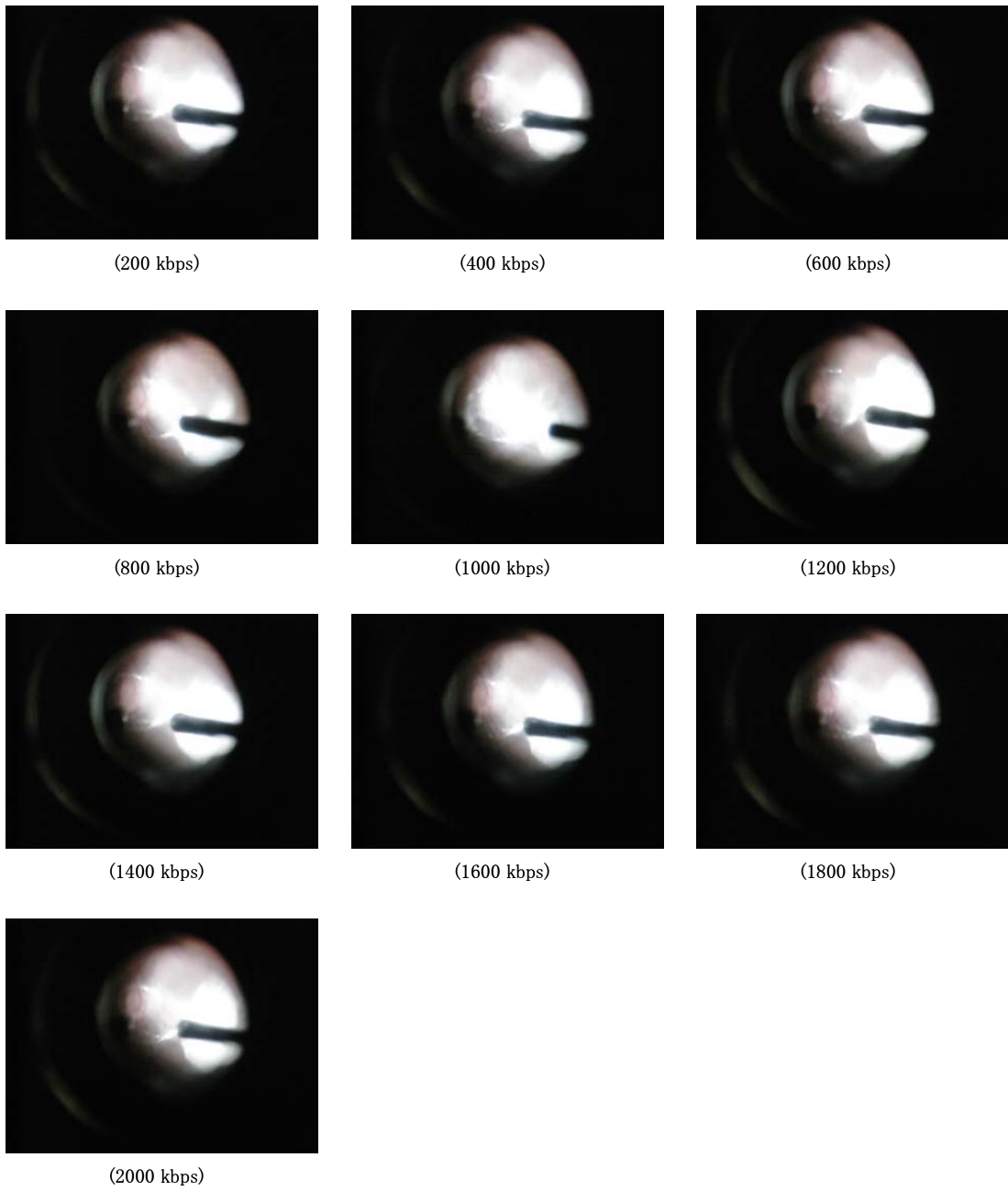


图 3.15 通信経路③ — 硝子体手術画像 1

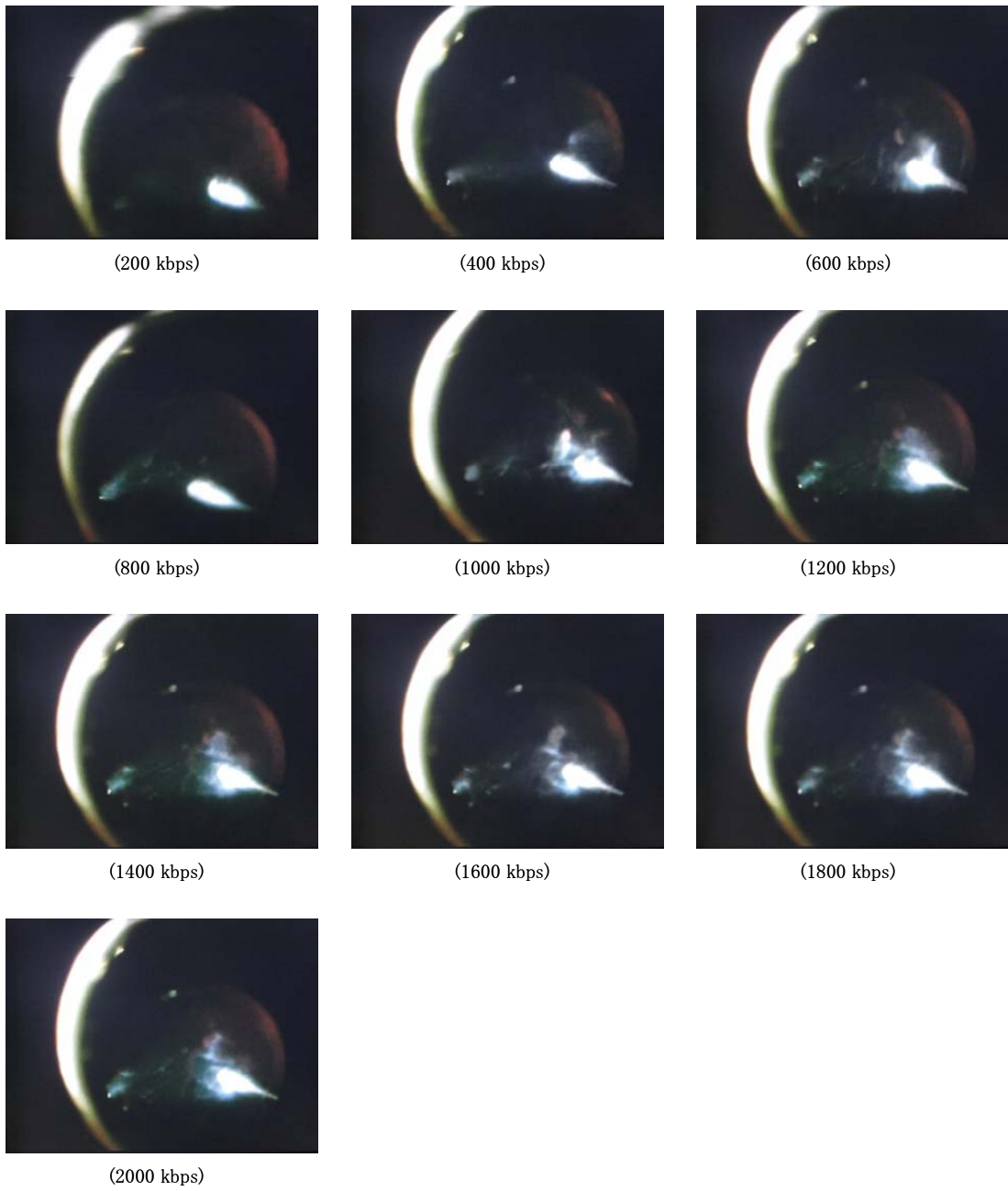


図 3.16 通信経路③ — 硝子体手術画像 2

3.1.3 客観評価実験

本実験では、3.1.2 項で作成した評価動画像の品質を画像客観評価装置によって確認した。実験方法と結果を以下に述べる。

(1) 実験環境

客観評価の環境を図 3.17 に示す。計 64 種類の評価動画像(圧縮画像)と各評価動画像に対応する原画像(非圧縮画像)を、2 台の DV 再生装置から画像客観評価装置へ同時に入力することで評価動画像の品質を測定した。画像客観評価装置(株K-WILL 製-VP21S)^[12]は、画質の劣化度を表す DSCQS(Double-Stimulus Continuous Quality Scale)値^[13]や SNR(Signal to Noise

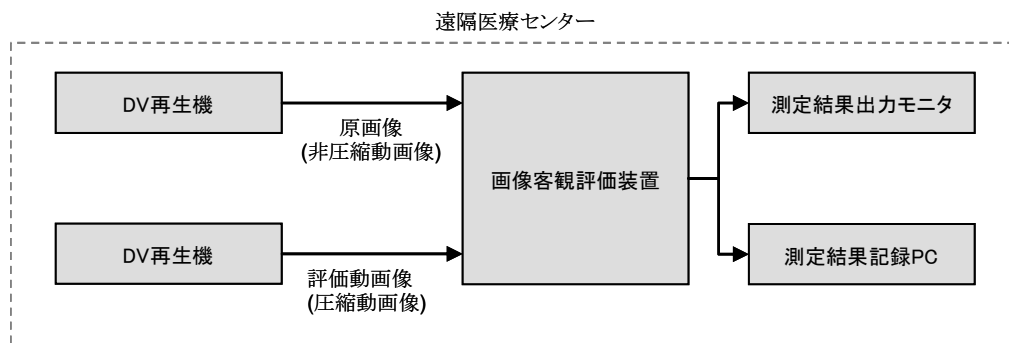


図 3.17 客観評価実験の環境



図 3.18 モニタに出力された画質測定結果の一例

Ratio)^[14]をほぼ実時間で測定することができ、その結果を測定結果出力モニターでリアルタイムに確認することもできる(図 3.18)。なお、本実験で使用した画像客観評価装置は、入力できる信号が NTSC アナログ信号に限定されるため、評価動画像ならびに原画像の解像度を CIF から NTSC へ変換した後に同装置へ入力した。

(2) 評価項目 - DSCQS値

DSCQS(二重刺激連続品質尺度法)は、ITU-R が定める主観評価方法の一つであり、評価対象画像の画質が原画像に比べてどれだけ劣化しているかを精密に測定することができる。通常は、15人以上の評価者に対し規定された実験環境の下で主観評価を実施するが、本実験で使用する画像客観評価装置は、画像中における被写体の混雑度合いや局所領域の雑音、空間周波数の変化などに基づいて、一般の評価者から得られる主観評価結果と同等の結果(DSCQS 値)を機械的に測定することができる。DSCQS 値は、画質の劣化度合いを 0%~100%の範囲で表現し、0%のとき画質劣化無しとなる。なお、ITU-R では、TV 放送に耐えられる品質の基準として、画像の 75%が DSCQS 値 12%以内、また残りの画像が DSCQS 値 30%以内であることと定めている^[15]。

(3) 評価項目 - SNR

画質の劣化度合いを客観的に評価するためのパラメータとして、画像信号に対するノイズの比率を表した SNR が用いられる。これは、入力された原画像 P と評価対象画像 P' から次式によって求められる。ただし、 i は画素番号である。

$$SNR=20\log_{10}\frac{\sqrt{\sum P_i^2}}{\sqrt{\sum (P_i - P'_i)^2}} \quad (3.5)$$

単位は dB であり、数値が大きいほどノイズが少なく高画質な画像であることを意味する。一般的には、40 dB 以上であれば良好な画質であると判断されるが、画像の種類や特徴によっては基準が変わることもあり、また SNR と主観評価結果が必ずしも一致するとは限らないことから、画質を大まかに知るための目安として利用されることが多い。

(4) 結果

図 3.19 は、DSCQS 値および SNR を通信経路別にまとめたものである。グラフの x 軸は符号化ビットレート、y 軸は DSCQS 値(図中の左列)と Y 信号および C 信号の SNR(図中の右列)を表している。まず、DSCQS 値に着目すると、全ての条件において 30%を超える結果となっている。このことから、遠隔医療支援システムで送受信される動画像の品質は、TV 放送品質として定められた基

準値を満たしていないことがわかった。DSCQS 値を評価動画間で比較すると、全ての通信経路ならびに全ての符号化ビットレートにおいて白内障手術画像が最高画質となっており、3.1.1 項(2)での平均情報量に基づく予想と矛盾する結果が得られたが、これは、白内障手術画像における被写体の動きが少ないために、時間軸方向の情報量が他の画像に比べて少なかったことが要因であると考えられる。次に、SNR に着目すると、Y 信号については大半が 30 dB を下回っており、画質が大幅に劣化していることが伺えるが、C 信号は概ね 40 dB 程度であり、一般的な判断基準からも良好な画質であると評価することができる。一方、C 信号は YCbCr 色空間の Cb、Cr 成分に相当する

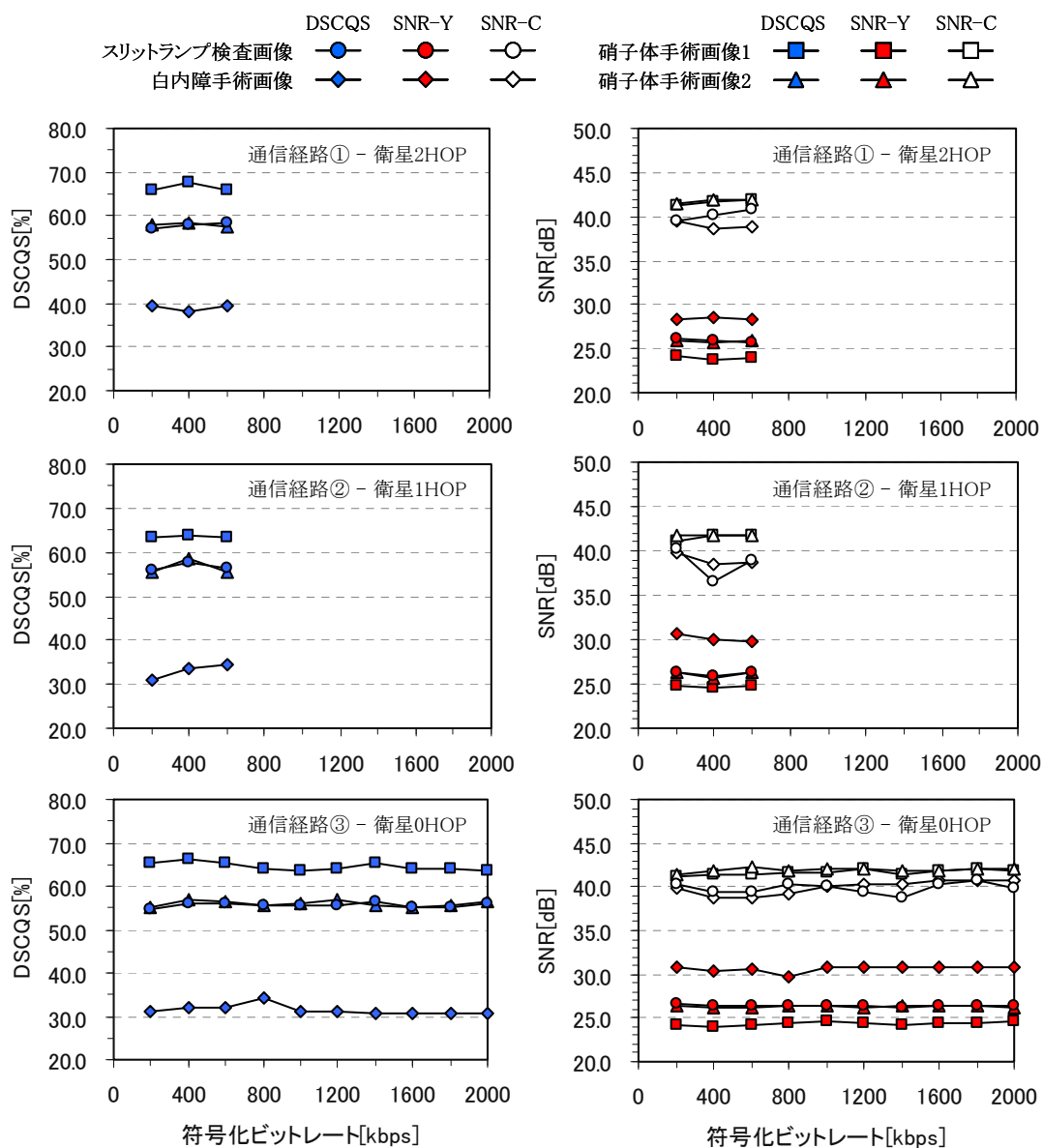


図 3.19 画質の客観評価結果(通信経路別)

ものであるが、本実験結果におけるC信号とY信号の画質の高低が、3.1.1項(2)で調べたY成分およびCb、Cr成分における平均情報量の大小関係と同じであることがわかる。このことから、平均情報量を求めることでY信号とC信号の画質の関係を把握できることが証明された。

なお、本実験で測定したDSCQS値は、TV放送等で扱われる一般的な動画像を一般の評価者が主観的に評価した場合の結果を推測したものであり、実際の遠隔医療支援を想定した場合の利用可否をDSCQS値のみで判断することはできない。従って、眼科医を評価者とする主観評価実験も行い、その結果と客観評価結果を総合的に判断した上で遠隔医療支援システムにおける実用品質を明らかにする必要がある。

3.1.4 主観評価実験

本実験では、3.1.2項で作成した評価動画像が実用に耐えられる品質であるかどうかを、眼科医を評価者とする主観評価実験によって確認した。実験方法と結果を以下に述べる。

(1) 評価者

評価者には、旭川医科大学に勤務する眼科医の中から、本実験で提示する眼科医療動画像の症例を診察・治療した経験があり、なおかつ画質を適切に評価できる10名を選定した。眼科医としての経験年数および矯正視力は表3.3の通りである。なお、ITU-R勧告では少なくとも15名以上の評価者で実験を行うことが推奨されているが^[14]、この勧告は、風景や映画などの一般的な動画像を評価経験の無い非専門家が評価することを前提としたものであり、本実験のように専門性の高い動画像を専門家が評価する場合には該当しない。

(2) 実験環境

遠隔医療センターで構築した主観評価実験の環境を図3.20に示す。計64種類の評価動画像

表 3.3 主観評価実験における10名の評価者

評価者	眼科医歴 (年)	矯正視力		眼鏡
		左	右	
I・S	13	1.2	1.2	無
Y・H	10	1.5	1.5	有
Y・A	32	1.0	1.0	有
T・A	14	1.2	1.2	有
I・S	20	1.0	1.0	有
H・K	14	1.0	1.0	有
K・M	12	1.0	1.0	無
K・H	16	0.7	0.7	無
T・A	8	1.2	1.2	有
K・R	18	1.0	1.0	有

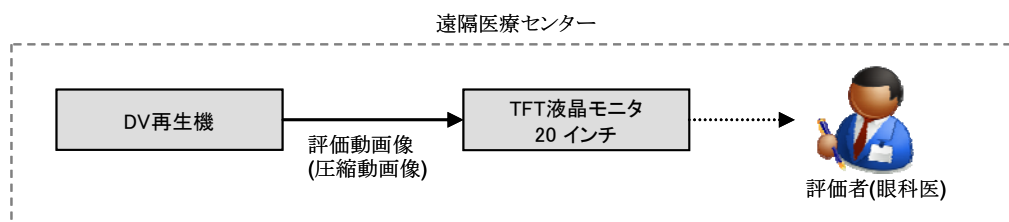


図 3.20 主観評価実験の環境

をDV再生機にあらかじめ蓄積しておき、それらを20インチのTFT液晶モニタへ出力することで、評価者への評価動画像の提示を行った。ただし、客観評価実験と同等の条件で画質を評価するために、DV再生機へ蓄積する時点で全ての画像解像度をCIFからNTSCへ変換した。

(3) 評価動画像の提示方法

表 3.4 で示すように、同一の通信経路において同一の原画像から生成された評価動画像の集合を1セッションとし、各セッション単位で評価を実施した。セッション内は、最低符号化ビットレート(200 kbps)から始めて徐々にビットレートを高めていく順番で提示を行った。すなわち、通信経路①、②に含まれるセッションにおいて最後に提示する評価動画像は符号化ビットレートが600 kbpsのものであり、通信経路③の場合は2000 kbpsである。なお、評価動画像の提示はそれぞれ1回ずつとした。

表 3.4 評価動画像の提示順番

提示No	通信経路	画像の種類	符号化 ビットレート (kbps)	提示No	通信経路	画像の種類	符号化 ビットレート (kbps)
1	① 衛星2HOP	白内障	200	33	③ 衛星0HOP	白内障	1800
2			400	34			2000
3			600	35		硝子体1	200
4		硝子体1	200	36			400
5			400	37			600
6			600	38			800
7			硝子体2	200			39
8		400		40			1200
9		600		41			1400
10		スリットランプ	スリットランプ	200			42
11				400		43	1800
12				600		44	2000
13	② 衛星1HOP			白内障	200	45	硝子体2
14		400	46		400		
15		600	47		600		
16		硝子体1	200	48	800		
17			400	49	1000		
18			600	50	1200		
19		硝子体2	硝子体2	200	51	1400	
20				400	52	1600	
21				600	53	1800	
22		スリットランプ	スリットランプ	200	54	2000	
23				400	55	スリットランプ	200
24				600	56		400
25	③ 衛星0HOP	白内障	200	57	600		
26			400	58	800		
27			600	59	1000		
28			800	60	1200		
29			1000	61	1400		
30			1200	62	1600		
31			1400	63	1800		
32			1600	64	2000		

(4) 評価動画像の観察方法

本実験では、旭川医科大学が従来から実施している遠隔医療支援と同等の環境を再現するために、机上に設置した液晶モニタに提示する評価動画像を、イスに座った状態で観察してもらった。なお、室内照明は全灯とした。また、モニタから評価者までの距離はおおよそ 3H(モニタの高さの3倍)とした。評価動画像を観察している様子を図 3.21 に示す。

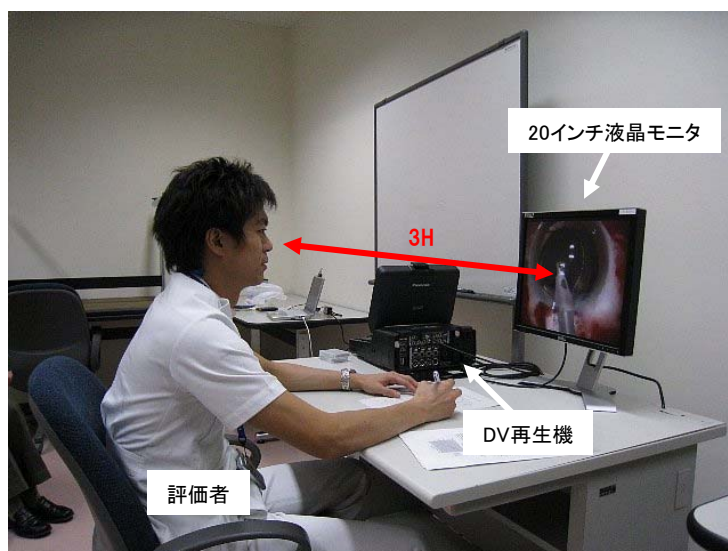


図 3.21 評価動画像を観察している様子

表 3.5 画質評価のための 5 段階評価尺度

評価点	尺度
5	(画質は)非常に良い
4	良い
3	普通
2	悪い
1	非常に悪い

(5) 画質の判定方法

評価者は、提示した評価動画像が遠隔医療支援を行う上で十分な画質であったかどうかを表 3.5 の 5 段階評価尺度に従って判定し、それに対応する評価点(1~5)を評価シートへ記入した。

(6) 結果

通信経路別にまとめた実験結果を図 3.22 に示す。グラフの x 軸は符号化ビットレートを、y 軸は評価者 10 名分の評価点平均を表している。ここでは、表 3.5 の評価尺度を考慮し、評価点平均が 3.0(普通)以上となる条件を、遠隔医療支援において実用可能な品質であると判断する。

まず、各通信経路において共通に存在する 3 種類の符号化ビットレート(200 kbps、400 kbps、600 kbps)に注目すると、同じ種類の動画像に対する評価点平均が全ての通信経路でほぼ同様の値を示していることがわかる。これは、動画像の品質が通信経路によって左右されることはなく、符号化ビットレートによって決定されることを意味する。そこで以降では、符号化ビットレートを広範囲

に設定した通信経路③の実験結果に着目して遠隔医療支援に対する実用性を考察する。

通信経路③では、全ての画像において符号化ビットレートの増加に伴う評価点平均の増加を確認することができる。しかし、実用可能(評価点平均 ≥ 3.0)と評価された限界の品質については、画像の種類によって異なる結果となった。硝子体手術画像 1、2 は、符号化ビットレートが 600 kbps の時に実用可能と評価されているのに対し、スリットランプ検査画像と白内障手術画像では 1600 kbps 以上の符号化ビットレートが必要となることが示されている。表 3.2 でも示したように、衛星回線を利用した動画のリアルタイム伝送において 30 frame / sec を維持できる最低符号化ビットレートは 600 kbps であるが、それを踏まえると、硝子体手術画像については問題にならないものの、白内障手術画像やスリットランプ画像では適切な医療支援を行うことが困難であると判断できる。これを解決するためには、30 frame/sec を保証できる広帯域な通信回線の使用と、画像品質を向上させるためのアプリケーション側の改善が必要となるが、前者については衛星通信サービスの制約があるため簡単に対応することはできない。そのため、遠隔医療支援システムの CODEC や映像伝送に関わる様々な機能の効率化によって伝送品質の向上を図ることが現実的な対応であると考ええる。

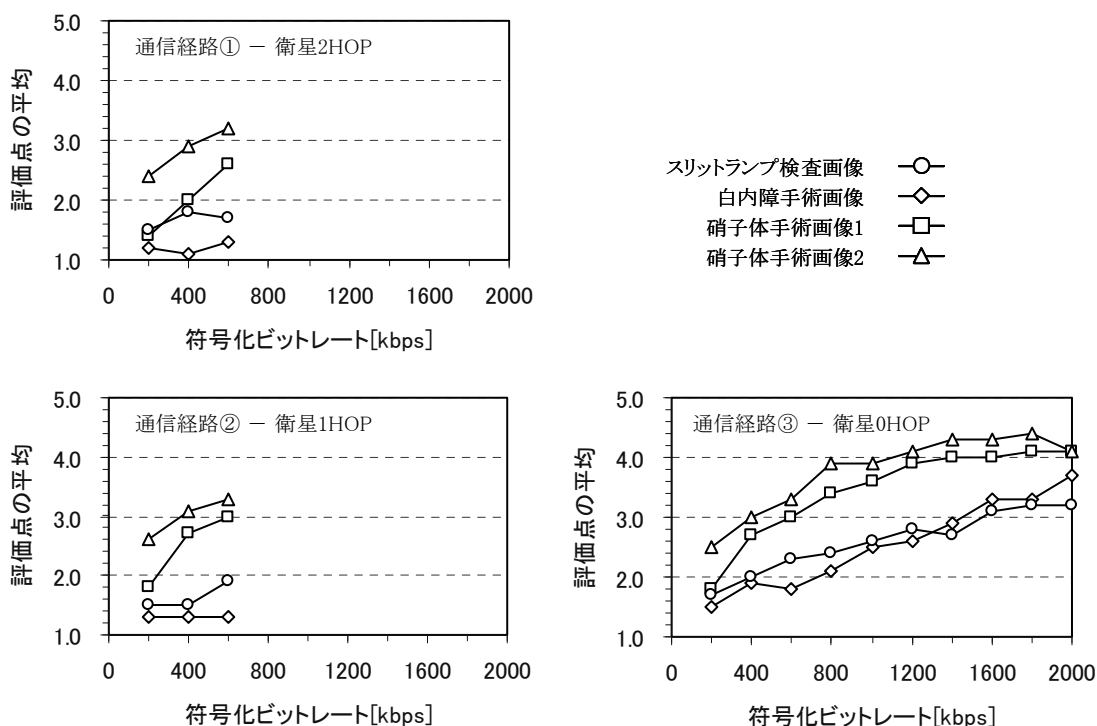


図 3.22 画質の主観評価結果 (通信経路別)

3.1.5 考察

先でも述べたように、客観評価実験によって得られた DSCQS 値は、TV 放送等の一般的な動画像を一般の評価者が主観的に評価した場合の結果を推測したものであるが、この実験結果(図 3.19)と主観評価実験結果(図 3.22)それぞれの白内障手術画像に対する評価値に注目すると、前者の実験では同一のビットレートで符号化した他の 3 種類の画像に比べて高品質であるという結果を得ているのに対し、後者では全ての符号化ビットレートにおいて最も低い評価がなされている。このことから、医療動画像の品質評価に関しては、一般評価者による主観評価結果が必ずしも専門医による評価と一致するとは限らないこと、また、実用品質を知るためには専門医を対象とする主観評価実験の実施が必須であることが明らかとなった。なお、今回の主観評価実験では衛星回線による遠隔医療支援が困難な条件が存在することを確認したが、その対策方法については次に報告する音声品質の評価結果も考慮した上で総合的に考察する。

3.2 音声の品質評価

ビデオ会議や e ラーニング等のリアルタイムアプリケーションでは、音声途切れることなくスムーズに通信できることが重要とされており、それを実現するために、狭帯域時には映像よりも音声のパケットを優先して伝送するような仕組みが実装されている。これと同様に、遠隔医療支援についても音声の高品質伝送は必須要件であり、音質低下に起因する誤認識や支援の中断等を確実に回避できるような品質保証が最重要となる。そこで本項では、遠隔医療支援システムによってリアルタイム伝送した音声の実用可能品質であるか否かを客観評価ならびに主観評価によって明らかにした。

3.2.1 客観評価実験

本実験では、遠隔医療支援システムでリアルタイムに伝送した音声データをあらかじめ録音しておき、それを再生した際の音声明瞭度(STI:Speech Transmission Index)を市販のアコースティックアナライザ(NTI 製:AL1)^[16]を用いて測定した。実験方法と結果を以下に述べる。

(1) 評価音の生成

利尻島国保中央病院の録音再生装置からスピーカ出力した音声データを遠隔医療支援システムでマイク入力し、それを図 3.4 で示した 3 通りの通信経路(2HOP、1HOP、0HOP)によって遠隔医療センターへリアルタイム伝送した。遠隔医療センター側では、遠隔医療支援システムで受信した音声データをスピーカ出力し、それを録音再生装置で録音したものを本実験における評価音とした。ただし、表 2.2 で示したように遠隔医療支援システムにおいて PCM 符号化された音声データ

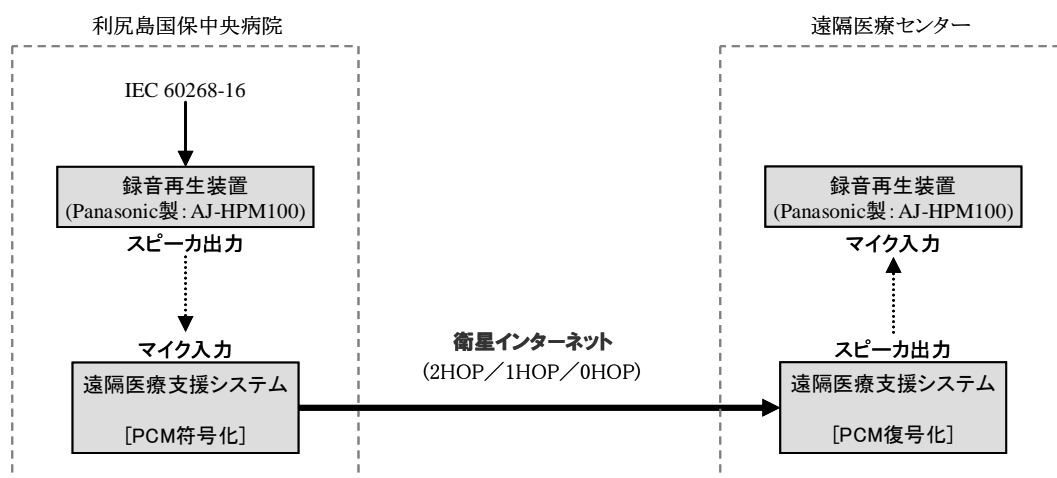


図 3.23 評価音の録音方法

の伝送ビットレートは 64 kbps 固定である。また、音声データはアコースティックアナライザに付随する STI 測定用の音響信号である。評価音の録音方法を図 3.23 に示す。

(2) 評価環境

遠隔医療センターで録音した 3 種類の評価音を、図 3.24 で示すようにオーディオミキサを通してスピーカ出力し、それをアコースティックアナライザへマイク入力した。本実験で使用したアコースティックアナライザは、コンサート会場での音圧レベルのテストやモニタリング、室内音響および STI の測定など、音響システムを設計する際に用いられるオーディオ測定器である。なお、STI については IEC 60268-16 規格^[17]に準拠した測定方法を採用している。

(3) 評価項目 - STI

STI は、ホール等の室内音場における音声の聞き取り易さ(=音声明瞭度)の評価法として提案されたものであり、音源位置で発せられた音声波形の包絡線が受信位置でどれだけ保たれているかを数値化したものである。実際には、STI の簡易測定による RASTI(Rapid STI)で用いられてい

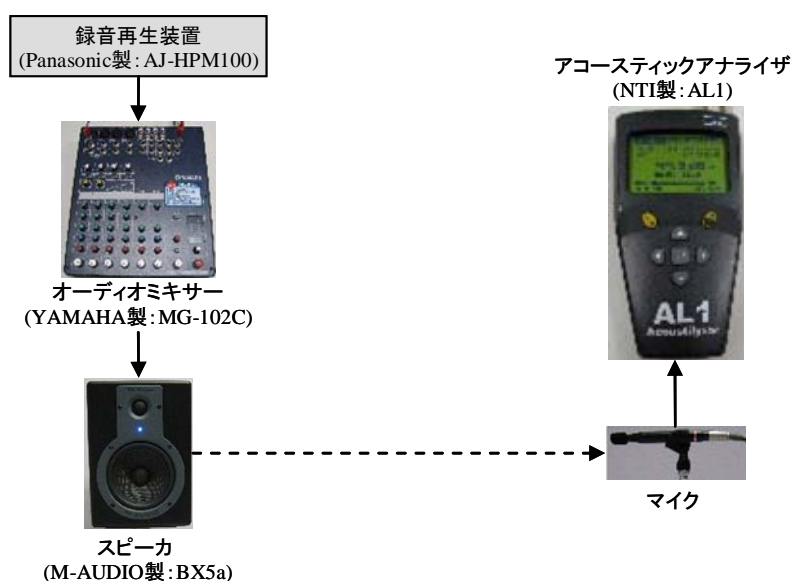


図 3.24 評価音の評価環境

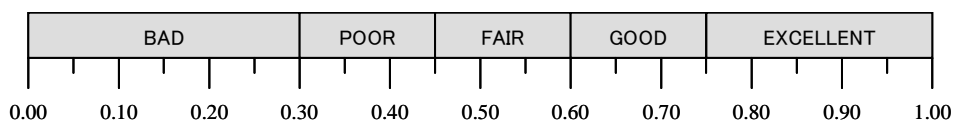


図 3.25 RASTI 値の評価指標

る基準により 0～1 で規格化され、図 3.25 のように“BAD”～“EXCELLENT”で評価する。一般に、0.6(“GOOD”)以上であれば良好な品質であると判断される。

(4) 結果

通信経路別に測定した評価音の RASTI 値を表 3.6 に示す。通信経路間では若干の差異が見られるが、評価指標はいずれも“EXCELLENT”を示しているため、遠隔医療支援システムで送受信される音声データは実用品質を満たしていると判断することができる。一方、通信経路間に注目すると、衛星回線の経由数(HOP 数)が少なくなるほど RASTI 値が増加する傾向にあるため、音声品質は通信経路によって変化することがわかる。音声品質が変化する主な要因としては、通信帯域不足やパケットロスなどが挙げられるが、遠隔医療支援システムにおける音声データの伝送ビットレートは 64 kbps であるため、理論上は通信経路①～③で帯域不足が発生することはない。そのため、UDP/IP 伝送に起因するパケットロスの発生が品質劣化の要因であると考えられる。また、表 3.6 における HOP 数と RASTI 値の関係から、衛星回線の HOP 数が増加するに従いパケットロス率も増加するものと推測できる。以上のことから、さらなる高品質化を図るためには、経由する衛星 HOP 数の削減とパケットロス防止のための TCP/IP プロトコルの適用が必要であると言えるが、後者の場合は伝送遅延の問題が生じるため、経由 HOP 数の削減が現実的な対応と考える。

表 3.6 RASTI 測定結果

	通信経路① 2HOP	通信経路② 1HOP	通信経路③ 0HOP
RASTI値 (評価指標)	0.79 (EXCELLENT)	0.80 (EXCELLENT)	0.84 (EXCELLENT)

3.2.2 主観評価実験

本実験では、遠隔医療支援システムでリアルタイムに伝送した音声データをあらかじめ録音しておき、それを再生した際の音声品質を主観評価実験で確認した。実験方法と結果を以下に述べる。

(1) 評価音の生成

利尻島国保中央病院の録音再生装置からスピーカ出力した音声データを遠隔医療支援システムでマイク入力し、客観評価実験と同じように 3 通りの通信経路によって遠隔医療センターへリアルタイム伝送した(図 3.23)。遠隔医療センター側では、遠隔医療支援システムで受信した音声データを動システムのスピーカで出力し、それを録音再生装置で録音したものを本実験における評価音とした。ただし、音声データのフォーマットは PCM であり、伝送ビットレートは 64 kbps 固定である。また、音声データには、ホール音響調整用として日本音響コンサルタントが製作した「Audio/Acoustics Technical CD for Professional use」(図 3.26)に収録されている No.73 「女性アナウ

Audio/Acoustics Technical CD for Professional use	
ホール電気音響設備調整用テストCD	
1 各種測定用信号	
① 1kHz正弦波基準信号	0:10
② ホワイトノイズ	0:30
③ ピンクノイズ	0:30
④ 擬似楽音ノイズ	0:30
⑤ 擬似音声ノイズ	0:30
⑥ ④・⑤ 1~5 位相チェック用ピンクノイズ	各0:05
⑦~②④ バンドノイズ	
⑦~⑧ L:1/1oct, 31.5Hz~8kHz	各0:06
R:1/3oct, 20Hz~16kHz (各周波数毎に④・⑤付)	
⑩~②④ 1/1oct, 63Hz~8kHz 各バンド繰返し	6:30
②⑤~③③ ステップダウンピンクノイズ -15dB~-70dB	1:25
②④ 正弦波スweep 50秒	0:53
②⑤ 正弦波スweep 150秒	2:33
③⑥~④⑦ トーンバースト	
③⑥~③③ 125, 500, 2000Hz (ハミング)	0:25
③⑥~④③ 測定器簡易チェック用	1:11
④④~④⑦ レベルメータチェック用	0:54
④③~④④ RT60チェック用減衰信号	2:33
④⑤ エコーチェック用バースト	0:14
2 調整用実音源	
④⑥ ウッドブロック(シンセサイザー)	0:14
④⑦ バスドラム(単発音)	0:06
④⑧ タムタム(単発音)	0:19
④⑨ スネア(単発音)	0:10
④⑩ スネア(連打)	0:08
④⑪ ドラムス	1:07
④⑫ エレクトリック・ベース	0:10
④⑬ エレクトリック・ベース(チョッパー)	0:16
④⑭ アコースティック・ギター	0:56
④⑮ エレクトリック・ギター(1)	0:50
④⑯ エレクトリック・ギター(2)	0:28
④⑰ トランペット	0:23
④⑱ テナー・サクソ	0:35
④⑲ バリトン・サクソ	0:30
④⑳ 男声ボーカル	0:35
㉑ 女声ボーカル	0:14
㉒ ストリングス・カルテット	0:44
㉓ 女声アナウンス/NHK山田敦子アナウンサー	1:33
㉔ 男声アナウンス/NHK相川 浩アナウンサー	1:29
3 試聴用音源	
㉕ 三国幻想曲/鬼太鼓座	2:14
㉖ やすらぎ/アニメーションビデオ「炎・トリッパー」より	1:35
㉗ Shine Love/飯島真理	2:09
㉘ 雅楽/「納管利」より	2:02
㉙ ジェット機+YS11/小松空港にて	1:46
㉚ 運命の力序曲/ G.ベルディ作曲・アーナルド・D.ゲイブリエル指揮 東京佼成ウインドオーケストラ	2:51
㉛ 走り/東大寺二月堂お水取りより	1:11
㉜ Isn't it Romantic/リチャード・ロジャース作曲 原 信夫指揮・# & b	2:32
㉝ GO WHERE?/笠箏KUGOより	0:25
㉞ 「新世界交響曲」より/ドボルザーク作曲 渡辺暁雄指揮・日本フィルハーモニー交響楽団	2:41
4 騒音源	
㉟ 航空機の離陸音	6:51
㊱ ④④・④⑤ 1 自動車走行音 測定距離5m	2:58
㊲ ④④・④⑤ 2 自動車走行音 測定距離25m	2:56

図 3.26 評価音に用いた音声データ

ンス／NHK 山田敦子アナウンサー」および No.74 「男性アナウンサー／NHK 相川浩アナウンサー」を使用した。

(2) 評価者

(1)で述べたように、評価音として医学とは無関係の音声データを利用するため、3.14 で報告した動画像の品質評価とは異なり、伝送品質の善し悪しを主観的に判断する上で医学的な知識を必要としない。そこで本実験では、医学知識や音声品質に対する評価経験を持たない 10 名の非専門家を本実験の評価者とした。

(3) 評価環境

図 3.27 で示すように、遠隔医療センターで録音した 6 種類の評価音(通信経路 3×音声データ 2)を、オーディオミキサーを通してスピーカへ出力する環境を用意した。

(4) 評価音の視聴方法

評価者は、図 3.28 のように机上に設置したスピーカの正面に座って評価音を視聴した。一方、音質を評価する方法としては、受話器を用いた IP 電話サービスの通話品質評価法¹⁸⁾があり、その中で ITU-T 勧告 G.107(E-model)の R 値¹⁹⁾を評価指標とすることが定められている。R 値は、複数のパラメータに基づいて決定されるが、その中の一つである音量が変化することによって R 値も変化することから、実験条件の統率化を図るために音量を一定にした状態で評価を実施するのが一般的である。これに対して、本実験では音質の実用性を評価することが目的であり、可能な限り実

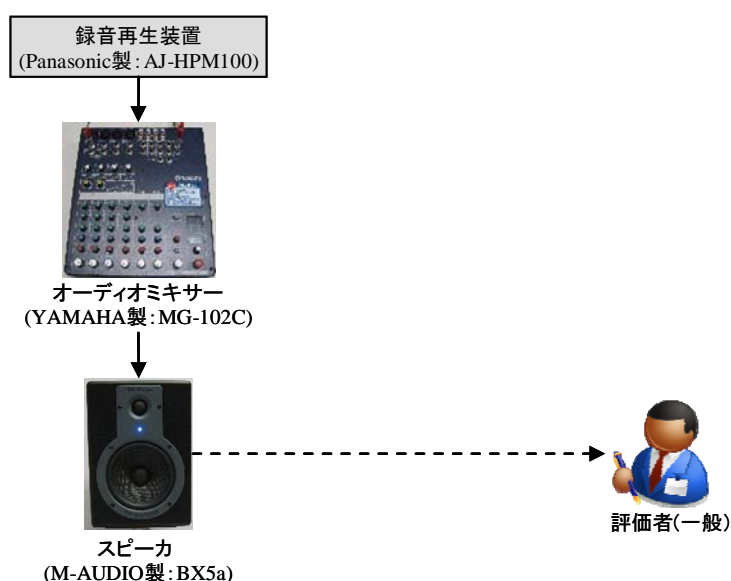


図 3.27 音声品質の評価環境



図 3.28 非専門家による音声品質評価の様子

表 3.7 音声品質の 5 段階評価尺度

評価点	音声明瞭度	文章理解度
5	(音質は)非常に良い	(理解するための)努力は不要
4	良い	注意は必要だが、特別な努力は必要ない
3	普通	少し努力が必要
2	悪い	かなり努力が必要
1	非常に悪い	どんなに努力しても理解できない

運用に近い環境で視聴することが重要となるため、評価者にとって最も視聴しやすい音量で評価することが望ましい。そこで、評価音を視聴する直前に、評価者自身がオーディオミキサーを操作して最適な音量(dB)に調整してもらうこととした。

(5) 音声品質の判定方法

評価者は、計 6 種類の評価音を各 1 回ずつ視聴し、主観的判断に基づく音声明瞭度と、アナウンサーのスピーチ内容に対する理解度(文章理解度)を、それぞれ表 3.7 で示す 5 段階評価尺度に従って判定した。また、視聴の直前に評価者が自身で調整した音量(dB)も記録した。なお、本実験では同表の評価尺度に基づき、音声明瞭度が 3 以上、文章理解度が 4 以上のときに実用可能な品質であると判断した。

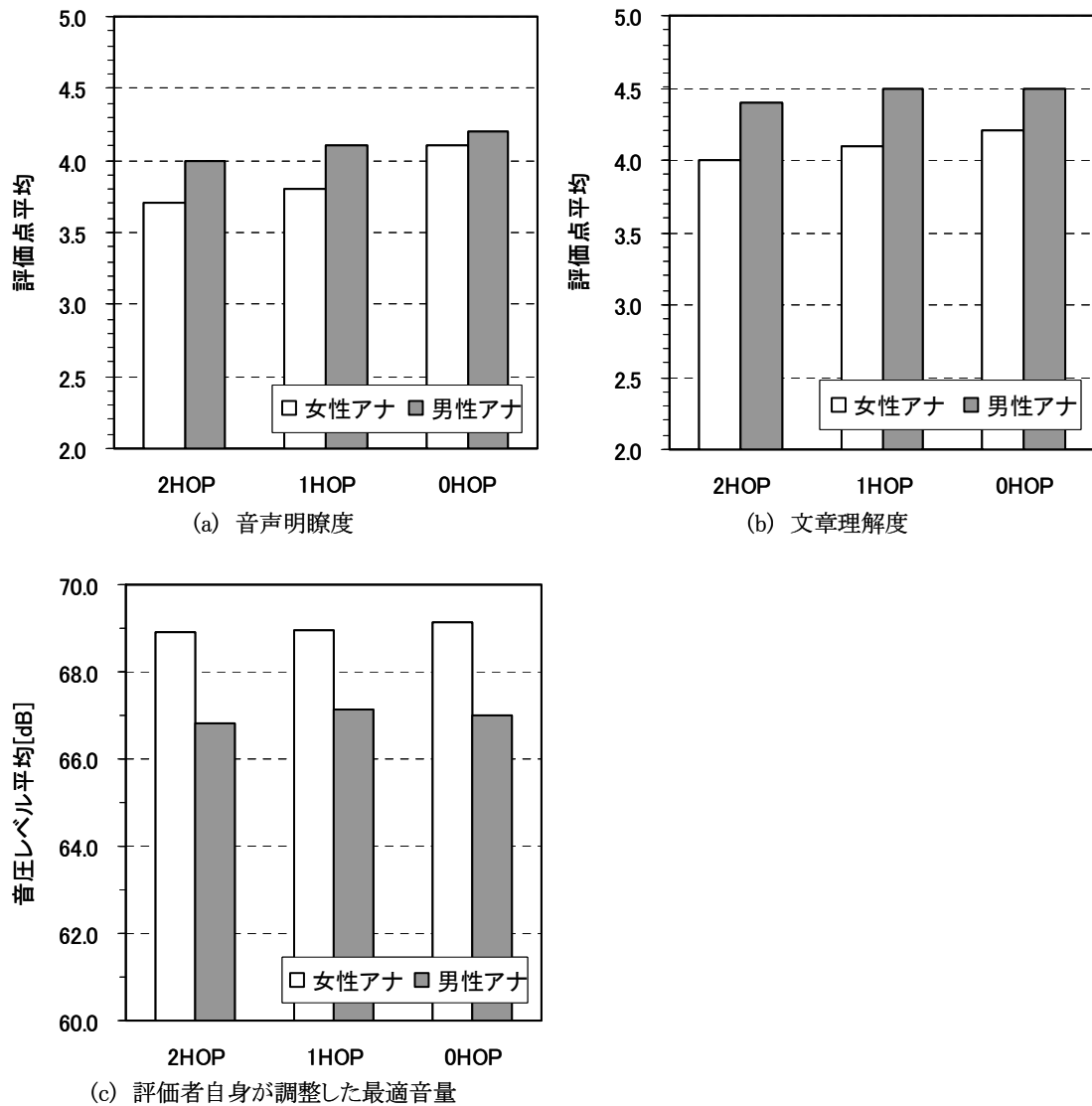


図 3.29 音声品質の評価結果

(6) 結果

音声明瞭度および文章理解度に対する評価結果をそれぞれ図 3.29 の(a)と(b)に、評価者自身が調整した音量を同図(c)に示す。ただし、いずれも評価者 10 名の平均値である。また、同図(c)は音量を音圧レベル(dB)で表している。この結果、音声明瞭度については通信経路や評価音の違いによらず評価点平均が3以上であり、文章理解度についても全ての条件で評価点平均が4以上となっているため、遠隔医療支援システムで送受信される音声データが実用的な品質であることが明らかとなった。また、HOP 数が減るほど評価点平均がやや向上する傾向にあるため、客観評価実験の結果と同様に HOP 数と音声品質との間に関係があることもわかった。一方、評価音間

で比較すると、音声明瞭度と文章理解度の両方で、女性アナウンサーの評価点平均が男性アナウンサーより低い値を示している。また、同図(c)では女性アナウンサーの評価音を視聴する際の音圧レベルを男性アナウンサーの時より高く調整していることがわかる。このような評価結果の性差は、男女間における音声周波数の違いと PCM 符号化^[20]アルゴリズムに起因するものと考えられる。一般に、平均的な声の周波数は男性に比べて女性の方が高いことが知られているが、PCM 符号化は音声周波数の振幅が大きいほど(高周波成分を多く含んでいるほど)量子化による歪が顕著になるという性質を持つため、周波数の低い男性の音声に比べて女性の音声の方が品質劣化は生じやすいこととなる。このことが、音声明瞭度や文章理解度の主観評価に影響を与え、また視聴しやすい音圧レベルの相違を生んだものと考えられる。なお、品質劣化度合いの性差を解消する方法としては、音声信号の特徴に合わせた効率的な符号化を実現する ADPCM 符号化^[21]の適用などが考えられるが、今回の実験では音声データが実用品質を満たしていることを確認しているため、今後さらなる品質向上が要求された場合に検討を行うこととする。

3.2.3 考察

客観評価実験ならびに主観評価実験によって、遠隔医療支援システムでリアルタイムに送受信される音声の実用可能な品質であることを明らかにした。これにより、現時点では音声品質を向上させるための機能改善を行う必要性はないと考える。ただし、伝送効率の観点では改善の余地が残されている。遠隔医療支援システムが採用している PCM 符号化は、音声データを 64 kbps 固定で伝送する方式であるが、通信帯域が極端に狭くなり映像ビットレートを圧迫するような状況下では、音声データのさらなる圧縮も考慮しなければならない。この場合、PCM 符号化と同等の品質でビットレートを半減できる ADPCM 符号化や、音声符号化として近年の主流となりつつある CELP(Code excited Linear Prediction)符号化^[22]などの適用が有効と考えられる。そのため、今後は主観的な品質低下が生じないことを確認した上で PCM 符号化に替わる効率的な符号化方式の導入も検討する。

3.3 伝送品質の保証方法に関する考察

これまでの実験から、音声については衛星回線を使用した場合でも実用品質で伝送できることが明らかとなり、動画像については衛星回線の帯域不足に起因して伝送品質が保証できない場合があることを確認した。すなわち、遠隔医療支援システムの伝送品質を保証するためには、動画像符号化アルゴリズムの特性を理解した上で符号化・伝送効率の向上を図ることが必須となる。

遠隔医療支援システムでは、2.2.3 項(4)で述べたように動画像を H.264 で符号化している。この方式は、図 2.11 のように動画像の各フレームを 3 種類のピクチャ(I、P、B)に分類して符号化するものであるが、符号化後のデータ量は一般的に $I > P > B$ の関係を持ち、各ピクチャを実時間(1/30 sec)で伝送する場合の時間進行に伴う伝送ビットレートの変移は図 3.30 のようになる。この場合、最大の伝送ビットレートを持つ I ピクチャに合わせて通信帯域幅を確保すれば、情報を損失させることなく全てのピクチャを実時間で伝送することができる。ただし、P、B ピクチャを伝送する時点では I ピクチャを基準とした帯域を必要としないため、その間は帯域を非効率的に利用することとなる。その反面、衛星回線のように、I ピクチャの伝送に必要な帯域が確保できないときは、図 3.30 における I_0 ピクチャの完全な復元ができなくなるだけでなく、復号時に I_0 ピクチャを必要とする P_3 および P_6 ピクチャ、そして過去と未来の I、P ピクチャに基づいて復号される B_1 、 B_2 、 B_4 、 B_5 、ピクチャも復元できなくなり、次の I ピクチャ(I_7)を受信するまで画像品質が連続的に劣化し続けるか、あるいは再生できない状態となる。このように、H.264 で一定の画像品質を保つためには I ピクチャを確実に伝送することが重要となるが、そのための通信帯域幅を確保し続けることは帯域の非効率利用に繋がり、また、使用する通信環境によっては帯域の常時確保が困難なこともある。こうしたジレンマを解決する手段として、図 3.31 のように I ピクチャが持つデータの一部を後続の P ピクチャや B ピクチャに分配し、ピクチャ全体の伝送ビットレートを平均化させる方法が考えられる。これにより、画像品質を劣化させることなく使用帯域幅を狭めることができる。また、通信帯域幅が使用帯域幅よりも広ければ、符号化ビットレートを高めて画像品質を向上させることも可能となる。ただし、図 3.31 の例では B_2 ピクチャを受信した後でなければ I_0 ピクチャの復号ができないため、原理上 4/30 sec の再生遅延が生じる。すなわち、データを分配する時間幅(最も未来に位置するピクチャの時間)がそのまま再生遅延時間となる。従って、この手法を適用するためには、遠隔診断支援において許容される再生遅延時間を明らかにし、その範囲内で収まるような各時間へのデータ配分量を自動決定できる仕組みを検討しなければならない。

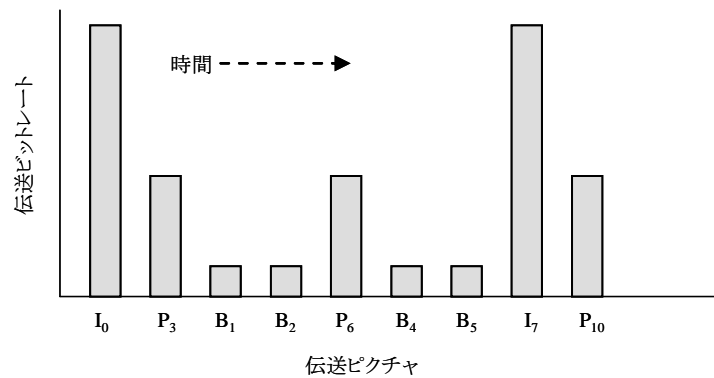


図 3.30 H.264 / MPEG-4 AVC における伝送ビットレートの変移

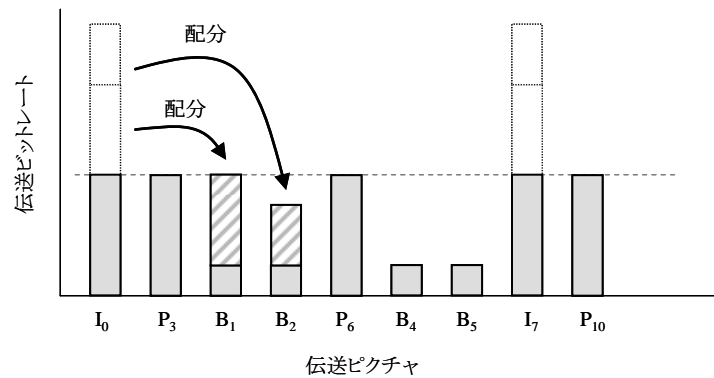


図 3.31 1 ピクチャのデータ配分による伝送ビットレートの平均化イメージ

3.4 まとめ

本研究では、衛星インターネット環境下において、遠隔医療支援システムでリアルタイム伝送した眼科医療動画像ならびに音声の実用可能な品質で再生されるかどうかを確認するための客観評価実験・主観評価実験を行った。その結果、音声については実用可能な品質で伝送されていることが明らかとなった。眼科医療動画像については、衛星回線の帯域不足に起因して品質が保証できない場合があることを確認した。また、一般の評価者による主観評価結果が専門医による評価とは一致しないことも明らかにした。医療動画像の伝送品質を改善する手段として、H.264 符号化における I、P、B ピクチャのデータ量を平均化する方法が考えられるため、その実装方法を今後の検討課題とする。

4 衛星通信の伝送遅延低減方法に関する研究

本学が推進する遠隔医療支援は、映像と音声の双方向リアルタイム通信、ならびに画像描画機能を活用した相談やアドバイスによって円滑なコミュニケーションが行えることを成立条件としている。しかし現実には、リアルタイム性を完全に保証することは難しく、様々な要因が重なって生じる送受信間での時間的なズレ(以降、伝送遅延と呼ぶ)によってコミュニケーションが阻害されることもある。伝送遅延の発生原因は、アプリケーションに起因するものと通信の過程で生じるものとの2通りに大別することができる。前者は、主にデータの圧縮伝送に伴って生じる遅延である。すなわち、送信側において音声や映像のアナログ信号をデジタル信号に変換し、それを符号化するまでに要する時間と、受信側で受信したデータを復号するための時間である。この場合、遅延時間は符号化方式の演算量に依存するため、少ない演算で実行できる方式を採用することが伝送遅延の低減対策となる。しかし、一般的に演算量と圧縮符号化効率には反比例の関係にあり、伝送品質を犠牲にしなければ遅延時間の低減は見込めないことから、安易に演算量の少ない符号化方式を採用することはできない。一方、通信の過程で生じる遅延は、パケットロスやパケット到着順の不整合などを修復するために要する処理時間が支配的となるが、この他に伝送距離や通信方式に依存する遅延もある。特に衛星回線は、4.1項で述べる理由によって原理的に遅延が発生し、光ファイバ等の有線回線に比べて遅延時間が長くなることが知られている。

以上のように、伝送遅延は様々な要因で発生し、これらの幾つか、あるいは全てが加算された時間をアプリケーション間における伝送遅延として体感することとなる。本研究の場合、通信インフラとして衛星回線を含む衛星インターネットを利用し、また動画像符号化には演算量の多いH.264を採用しているため、ユーザは比較的長い遅延時間を体感することが予想される。さらに、極度の遅延による遠隔医療支援の阻害やユーザに与える心理的ストレスの増加など、様々な問題に発展する可能性も考えられる。そのため、コミュニケーションに影響を与えない程度にまで遅延時間を低減させることが重要となる。しかし、現実には遅延の発生要因そのものを完全に絶ちきることはできず、個々の発生要因で生じる遅延時間を短くすることも技術的に困難である。そこで本研究では、遅延発生要因に対する改善策の検討は行わず、TV会議機能の仕組みに着目してユーザが体感する遅延時間を低減させる方法について検討した。以降では、衛星回線の利用に伴って生じる伝送遅延の発生原理とアプリケーション間における現状の伝送遅延時間を示した後、モバイル網と衛星回線を併用した遅延低減方法を提案する。

4.1 衛星通信による伝送遅延の発生原理

衛星通信は、図 4.1 に示すように地球局の送信側から赤道上空約 36000 km に静止する通信衛星(JCSAT-5A)に向けて電波を送信し、その電波を地球局の受信側へ転送することで実現される。このとき、電波の速度は 300,000 km / sec であることから、送信した電波が受信側に到達するまでの伝搬時間(伝送遅延時間)は、

$$\frac{36000 \times 2}{300000} = 0.24 \text{ (sec)} = 240 \text{ (ms)} \quad (4.1)$$

となる。

ただし、衛星通信区間(HOP)が複数に跨る場合の一方方向に対する遅延時間は 240 ms × HOP 数となる。また、大気の状態によっても遅延時間が延長する。

このように、衛星通信時には必ず伝送遅延が発生し、また、それを解消することは原理的に不可能であるため、衛星インターネットを利用するアプリケーションは、伝送遅延が生じることを前提とした設計が求められる。以上を踏まえ、本研究では遠隔医療支援システムの TV 会議機能に対して遅延発生を前提とする機能設計を行った。その実現方法については 4.2 項および 4.3 項で述べる。

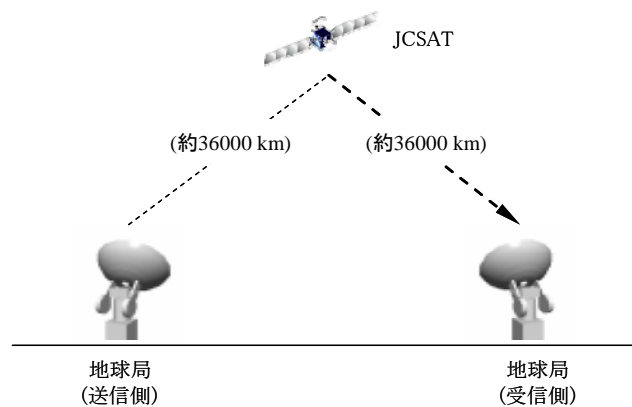


図 4.1 衛星通信の仕組み (HOP 数が 1 の場合)

4.2 アプリケーション間における伝送遅延時間の測定

遅延時間の低減化を図るためには、まず現状の環境でどの程度の遅延が生じているかを把握することが先決となる。そこで本項では、遠隔医療センターと遠軽厚生病院を通信拠点とし、衛星インターネット環境下で遠隔医療支援システムのTV会議機能を実行した場合の遅延時間を衛星回線のHOP数毎に測定した。なお、TV会議機能は動画像と音声を完全に同期させて伝送しており、いずれか一方の遅延時間を測定すれば機能全体の遅延時間を把握することができることから、本項では遅延時間の測定が容易な音声のみを対象とした。

4.2.1 測定方法

(1) 拠点間の通信経路

遠隔医療センターと遠軽厚生病院を図4.2で示す3通りの通信経路を用いて接続した。通信経

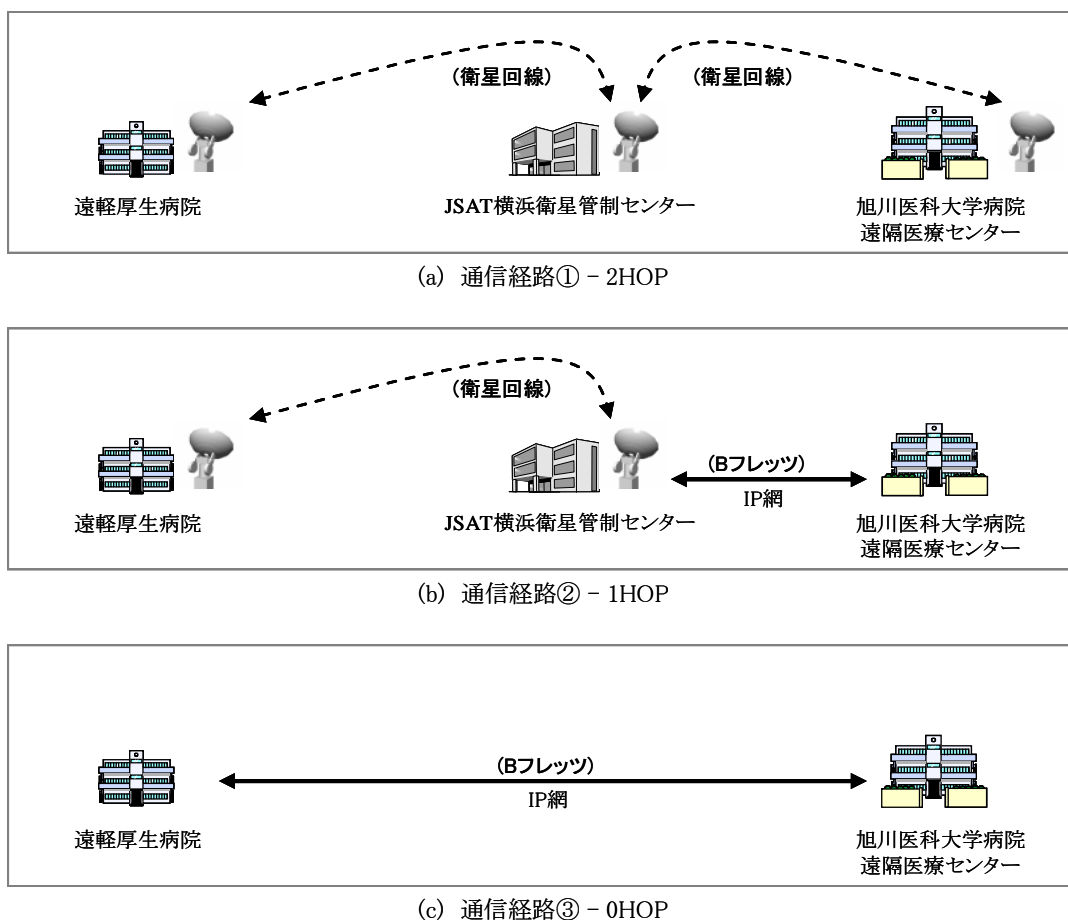


図4.2 遠隔医療センター／遠軽厚生病院間の通信経路

路①(同図(a))は、遠隔医療センターと遠軽厚生病院との間を衛星回線のみで接続する 2HOP の環境である。この経路の場合、衛星通信に起因する伝送遅延は 4.1 項で述べたように 0.24 sec×2 HOP となる。通信経路②(同図(b))は、遠軽厚生病院から JSAT 横浜衛星管制センターまでを衛星回線で接続し、そこから遠隔医療センターまでを B フレッツ回線で接続する 1HOP の環境である。通信経路③(同図(c))は、衛星回線を利用せずに B フレッツ回線のみで接続する環境であり、衛星通信に起因する伝送遅延時間はゼロとなる。なお、B フレッツ回線(光ファイバ)においても伝送遅延は発生するが、仮に旭川・遠軽間の距離を 120 km とし、この間を光ファイバ 1 本で直結した場合の理論上の遅延時間は 0.4 ms と極僅かである。また、実際にはインターネット網内の様々な通信媒体や複雑な通信経路を経由するため、実測値は理論値よりも長くなることが予測できるが、衛星回線に比べれば無視できる程度と考える。

(2) 測定環境

伝送遅延時間は、一方の遠隔医療支援システムから音声データを送信した時刻と、もう一方で受信した時刻との差を求めることで測定できる。この場合、ハードウェアに内装されているシステム時計を基準に時間を測ることとなるが、2 台の端末のシステム時計を完全に同期させることは技術的に困難であるため、測定精度の低下が問題となる。そこで、システム時計に頼らない方法で伝送遅延時間を測定できる環境を構築した。

図 4.3 で示すように、遠隔医療センターの送信用システムから送信した音声データを遠軽厚生病院のルータで受信し、そのデータを同病院内のシステムには転送せずに、そのまま折り返して遠隔医療センターの受信システムへ送信できる通信環境を用意した。ただし、送信用システム

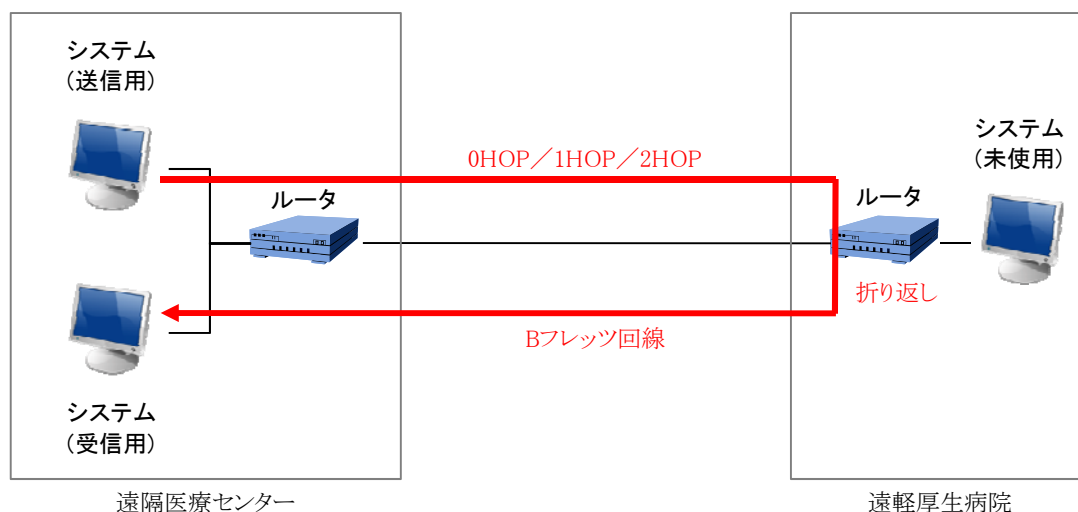


図 4.3 伝送遅延時間測定のための通信環境

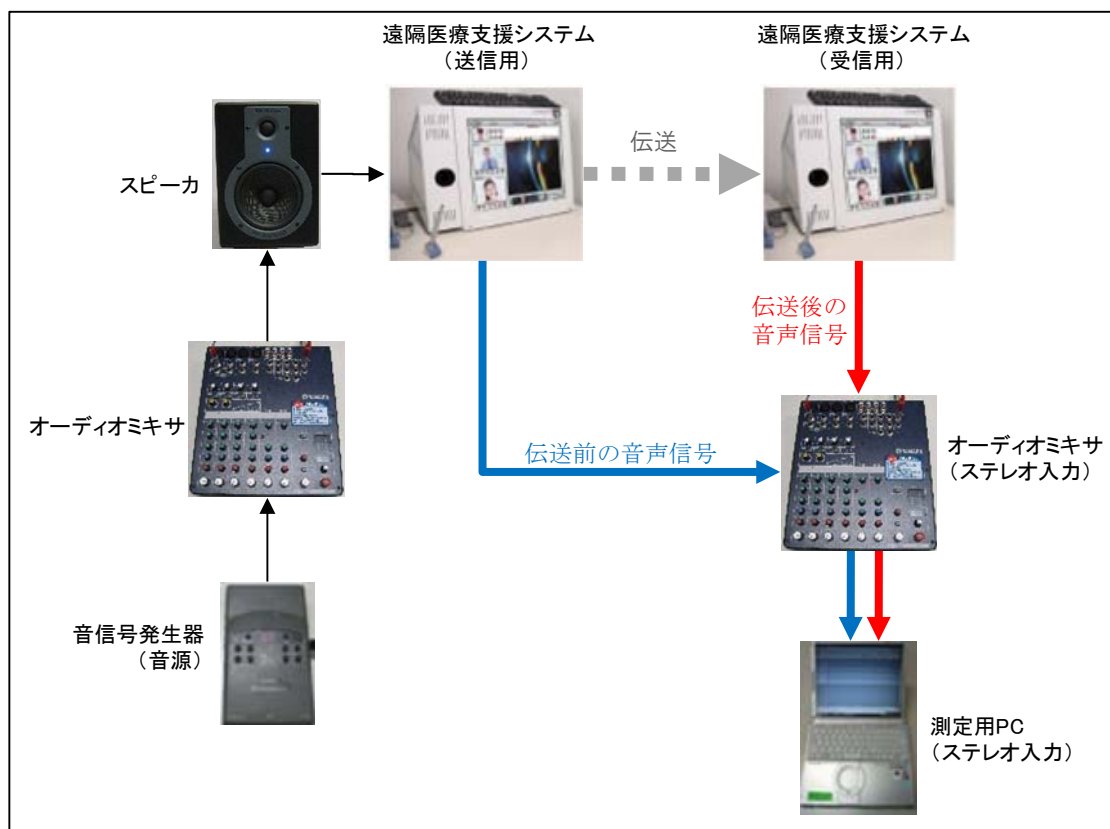


図 4.4 音声信号による伝送遅延時間の測定環境

からルータまでの通信経路は図 4.2 で示した 3 通りである。また、ルータから受信システムまでは B フレッツ回線(OHOP と同じ)によって転送している。

遠隔医療センター側では、図 4.4 の環境で音声データの遅延時間を測定した。まず、限りなく無音に近い状況下で、信号発生器から出力した 1 kHz のビープ音(以降、評価音と呼ぶ)を音量調整した上でスピーカに出力し、マイクを通して送信用システムへ入力した。同システムが入力した音は、衛星インターネットを用いて遠軽厚生病院へ伝送するのと同時に、ステレオ入力可能なオーディオミキサの L(Left)側(図 4.4 の青ライン)へ出力した。一方の受信システムは、受信した音データをオーディオミキサの R(Right)側(図 4.4 の赤ライン)へ出力した。これにより、オーディオミキサは伝送前(L)と伝送後(R)の音を同時に入力することとなる。L/R で同時入力した音は PC へ出力し、それをステレオオーディオファイル(WAV 形式)として録音した。

(3) 周波数解析に基づく伝送遅延時間の測定

伝送遅延時間の測定には、オープンソースのレコーディングおよびサウンド編集ソフトウェアである Audacity ver1.2.6^[23]を用いた。Audacity は、音の周波数特性をビジュアル化できる機能を持ち、

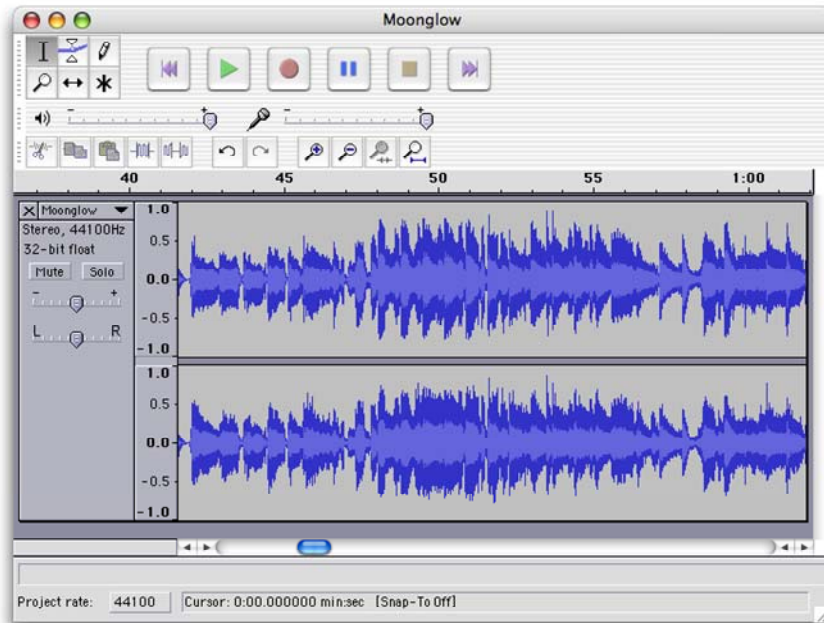


図 4.5 Audacity : ステレオデータの周波数表示 (例)

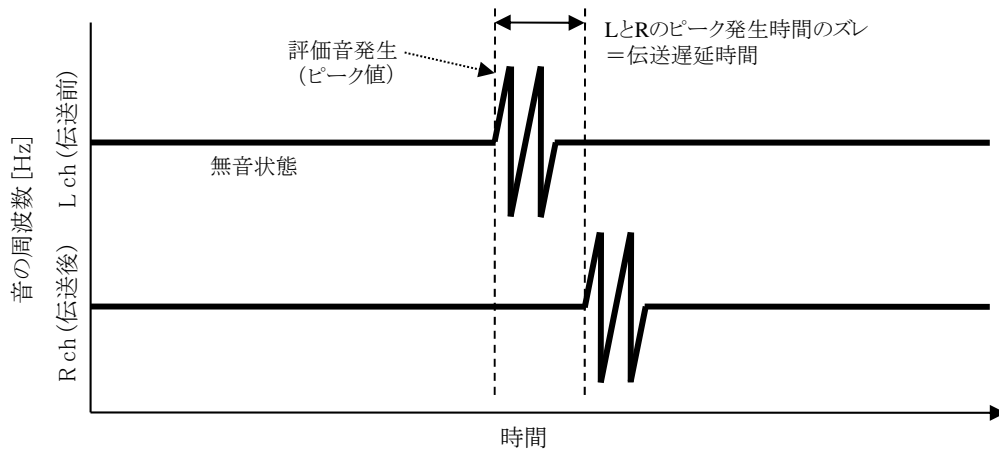


図 4.6 周波数を利用した伝送遅延時間の測定方法

さらに図 4.5 で示すように 2ch の同時表示も可能である。

ここでは、先に録音した WAV 形式のステレオオーディオファイルを読み込み、L /R 両方の周波数を図 4.5 のようにビジュアル表示した後、信号発生器から出力した評価音の L/R 間における時間のズレを解析した。評価音は、室内を限りなく無音に近づけた状態で発生させているため、評価音が発生してから消えるまでの時間帯に周波数がピーク値を示す。それを利用し、図 4.6 で示すように L(伝送前)と R(伝送後)それぞれの周波数が初めてピーク値を示す時間の差を求めることで伝送遅延時間を測定した。

4.2.2 測定結果

4.2.1 項の方法を用い、通信経路毎の伝送遅延時間を連続的に 10 回ずつ測定した。その結果を表 4.1 に示す。なお、以降では 10 回の測定結果から算出した平均値(同表の最下段)を各通信経路における伝送遅延時間とする。

表 4.1 より、1 つの衛星通信区間を経由する 1HOP の伝送遅延時間は 447 ms であることがわかったが、4.1 項で述べたように衛星通信では原理的に 240 ms の遅延が発生するため、447 ms から 240 ms を引いた時間、約 207 ms がコーデック等のアプリケーション側に起因する遅延であると考えることができる。それを基準にすると、0HOP では伝送遅延時間が約 399 ms であるため、そのうちの 207 ms をアプリケーション側の処理遅延とすれば、残りの 192 ms が地上インターネット網で生じる遅延と判断できる。2HOP の場合、衛星通信区間を 2 つ経由するため、衛星通信に起因する遅延時間も 1HOP の 2 倍(480 ms)となる。しかし、表 4.1 の伝送遅延時間は約 1706 ms であり、そこから 480 ms を引いた残りの時間がアプリケーション側の処理遅延(207 ms)より 1000 ms 以上も長いことから、実環境下では衛星通信やアプリケーションによる遅延以外にも様々な遅延発生要因が存在しているものと考えられる。

4.2.3 考察

今回の測定では、1HOP の伝送遅延時間が衛星通信を全く利用しない 0HOP と僅差であることが判明した。これは、伝送遅延を発生させる支配的要因が衛星通信ではないことを示唆しており、

表 4.1 遠隔医療支援システムにおける通信経路毎の伝送遅延時間

回数	0HOP	1HOP	2HOP
1	396.87	446.68	1706.33
2	398.08	448.00	1706.33
3	398.08	446.38	1706.33
4	399.29	446.38	1706.33
5	399.29	446.38	1706.33
6	399.29	446.38	1706.33
7	399.29	446.38	1706.33
8	399.29	446.38	1706.33
9	399.29	448.00	1706.33
10	399.29	446.38	1706.33
平均	398.81	446.74	1706.33

衛星通信に起因する遅延時間を軽減させても大きな改善効果が得られないことを意味する。従って、1HOP については伝送遅延時間の軽減対策を積極的に検討する必要性は少ないと判断する。しかし、2HOP の場合は 1HOP に比べて伝送遅延時間が大幅に増加しており、実用面においては円滑なコミュニケーションを阻害する可能性も十分に考えられる。それを確認するため、次降では伝送遅延が遠隔医療支援に与える影響を主観評価実験で検証した。

4.3 遠隔医療支援における伝送遅延の影響度評価

ここでは、伝送遅延が発生する通信環境下で TV 会議を行った場合の心理的影響および遠隔医療支援の可否を、眼科医を評価者とする主観評価実験で確認した。方法および結果を以下で述べる。

4.3.1 評価方法

実際の遠隔医療支援を想定し、2拠点にいる眼科医同士が遠隔医療支援システムのTV会議機能によってリアルタイムにコミュニケーションできる環境を用意した。

(1) 評価者

評価者には、旭川医科大学眼科医局に所属する眼科医の中から、以降で述べる動画像ならびに静止画像を適切に評価できる10名を選定した(表4.2)。10名のうち9名は旭川医科大学病院、もう1名は遠軽厚生病院に勤務する眼科医である。なお、本実験では2名の眼科医を一組とし、眼科医歴の短い医師を支援依頼側、経験の長い医師を支援側とした上で、組毎に評価を実施した。

(2) 通信環境

4.2項で述べた伝送遅延時間の測定方法と同じ通信環境で評価を実施した。すなわち、遠隔医療センターと遠軽厚生病院間を図4.2の通信環境で接続し、衛星回線を使用しない0HOP、衛星回線を使用する1HOPおよび2HOPの計3経路を自由に切り替えて接続できるようにした。ただし、この環境では表4.2における5組目(遠隔医療センター・遠軽厚生病院間)の評価しか実施することができない。そこで、4.2項で構築したルータでの折り返し環境(図4.3)をそのまま利用し、遠隔医

表 4.2 影響度評価のための評価者(眼科医 10 名)

組	評価者	拠点	眼科医歴 (年)	遠隔医療 の経験	支援/依頼
1	H・K	遠隔医療センター	14	有	依頼
	I・S	遠隔医療センター	16	有	支援
2	Y・H	遠隔医療センター	10	無	依頼
	K・R	遠隔医療センター	19	無	支援
3	T・K	遠隔医療センター	0.7	無	依頼
	T・A	遠隔医療センター	14	有	支援
4	D・A	遠隔医療センター	8	無	依頼
	K・M	遠隔医療センター	12	無	支援
5	K・H	遠軽厚生病院	15	有	依頼
	H・H	遠隔医療センター	28	有	支援

療センターの眼科医同士を組みとする 1~4 組目が、遠隔医療センターに居ながら 5 組目と同等の条件で評価できるようにした。

(3) 遠隔医療支援の内容

各組の実験条件を合わせるため、端末の操作手順や会話の主な内容など一連の大まかなシナリオを事前に決定し、そのシナリオに従って擬似的な遠隔医療支援を体験してもらった。シナリオは、(A)支援依頼側がリアルタイムに送信するスリットランプ動画像を支援側が観察しながら会話するパターンと、(B)両者がサーバからダウンロードした同一の静止画像を観察しながら会話を行うパターンの 2 通りを用意した。

(パターン A) 動画像のリアルタイム伝送に基づく遠隔医療支援

図 4.7 で示すように、支援依頼側にスリットランプ顕微鏡を設置し、同顕微鏡の CCD カメラで撮影した健常者の眼球像を TV 会議機能によって支援側へリアルタイムに伝送した。支援側は、受

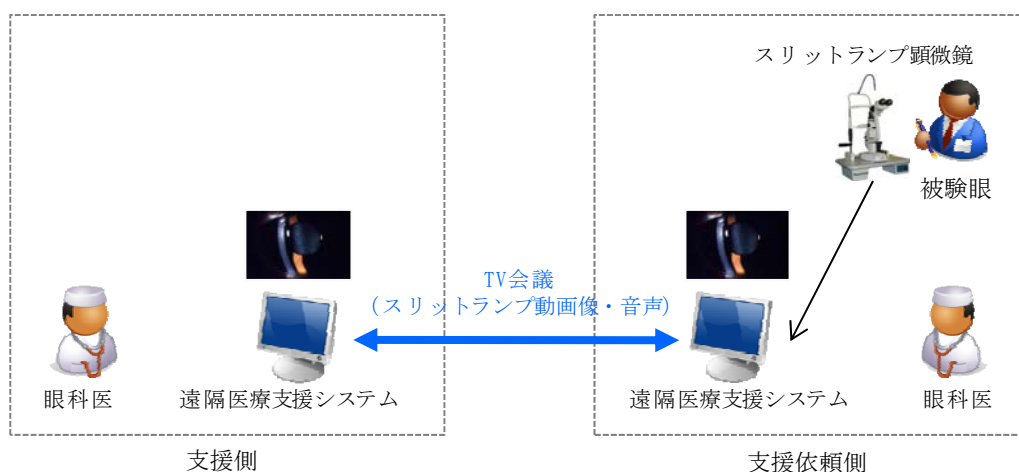


図 4.7 パターン A の実施環境

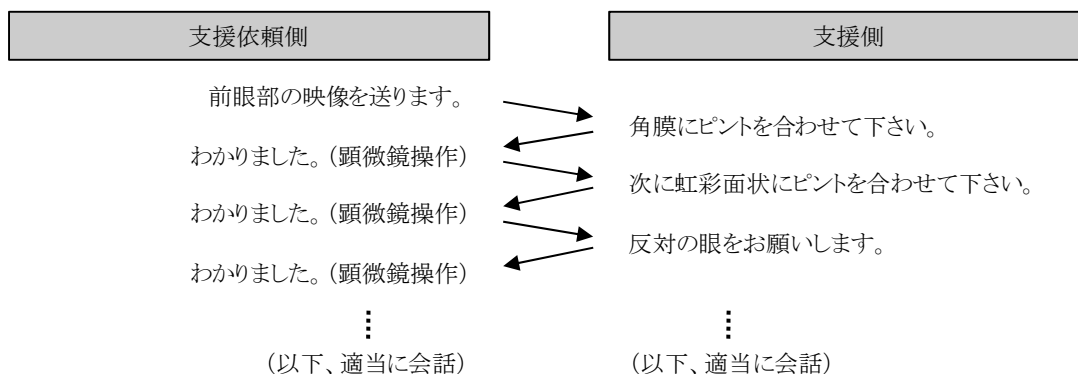


図 4.8 パターン A のシナリオ

信動画像を観察しながら支援依頼側へ顕微鏡操作の指示を行った。一連のシナリオは図 4.8 の通りである。この遠隔医療支援を、0HOP、1HOP、2HOP の環境で 1 回ずつ実施した。

(パターン B) 静止画像の共有に基づく遠隔医療支援

図 4.9 で示すように、サーバに蓄積されている実患者のスリットランプ画像や眼底画像の中から、2名の眼科医が互いに同じものをダウンロードし、その画像を両者で同時に観察しながら TV 会議機能や描画機能を用いて診断や治療方針に関する相談を行った。ここでは、ダウンロードする静止画像(図 4.10)とその症例画像に対応したシナリオ(図 4.11～図 4.13)を 0HOP、1HOP、2HOP それぞれで用意し、通信経路毎に各 1 回ずつ評価した。

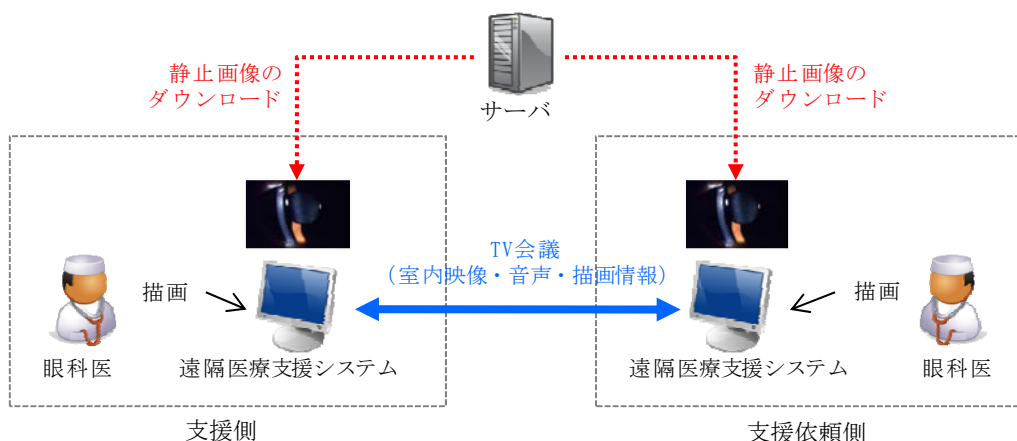


図 4.9 パターン B の実施環境

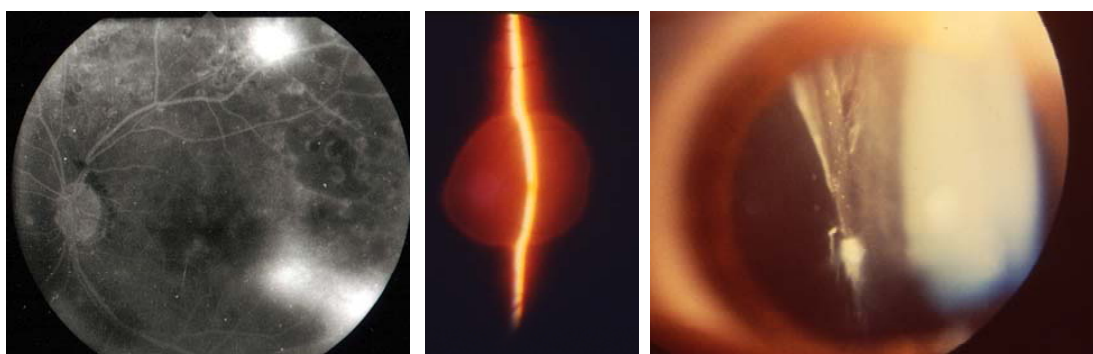


図 4.10 パターン B においてサーバからダウンロードした静止画像
(左 : 0HOP 用、中 : 1HOP 用、右 : 2HOP 用)

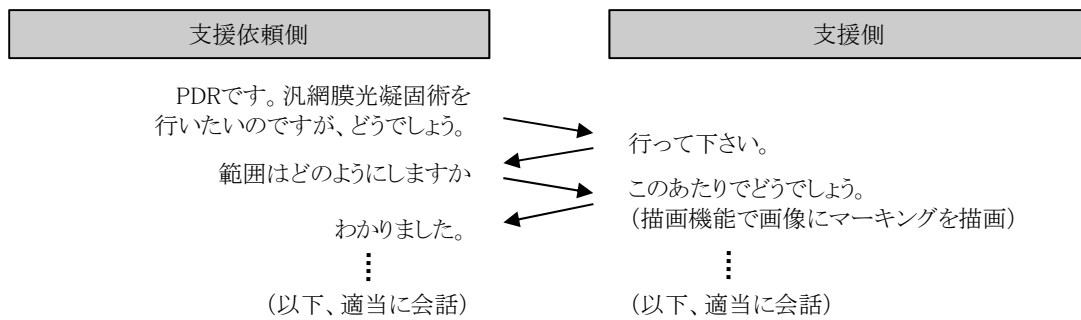


図 4.11 パターンBのシナリオ (OHOP 用)

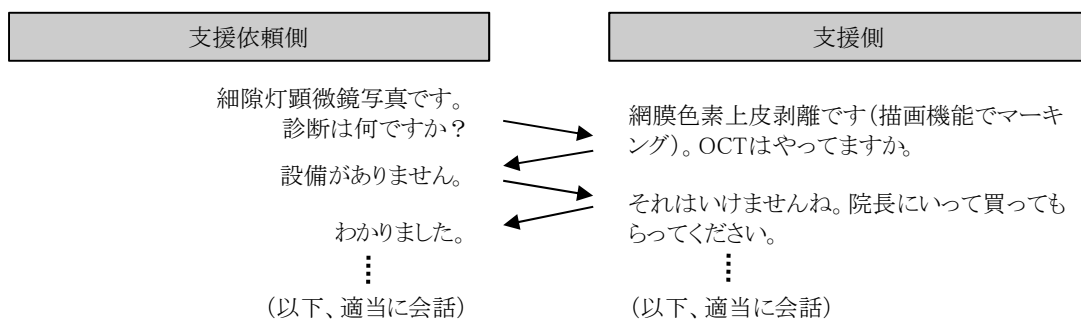


図 4.12 パターンBのシナリオ (IHOP 用)

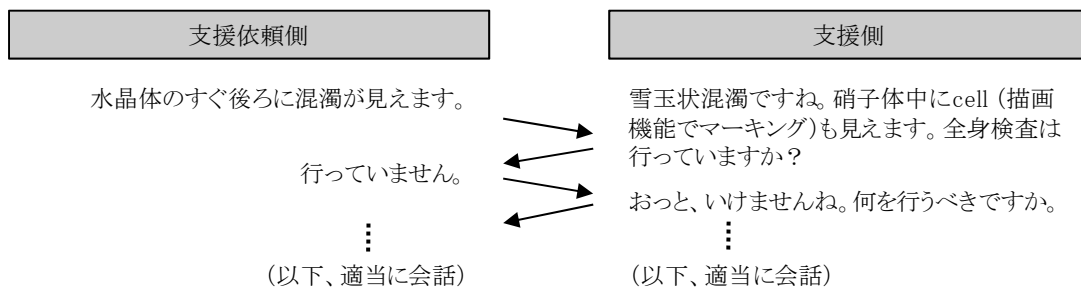


図 4.13 パターンBのシナリオ (2HOP 用)

(4) 実施手順

(3)で述べた2通りの遠隔医療支援(AとB)を表4.3の順番で実施した。

(5) 判定方法

各組の評価者(2名の眼科医)は、1回の遠隔医療支援を終えた都度、①遅延が気になったかどうか、②遠隔医療支援が可能かどうかを、それぞれ表4.4および表4.5で示す5段階評価尺度に従って判定した。

表 4.3 遠隔医療支援の実施順

No.	通信環境	パターン
1	0HOP	A
2	0HOP	B
3	1HOP	A
4	1HOP	B
5	2HOP	A
6	2HOP	B

表 4.4 評価項目①の5段階評価尺度

評価点	尺度
2	遅延は全く気にならない
1	遅延は気にならない
0	どちらとも言えない
-1	遅延が気になる
-2	遅延が非常に気になる

表 4.5 評価項目②の5段階評価尺度

評価点	尺度
2	遠隔医療支援は十分に可能
1	遠隔医療支援は可能
0	どちらとも言えない
-1	遠隔医療支援は難しい
-2	遠隔医療支援は不可能

4.3.2 評価結果

図 4.14 は、通信経路と遠隔医療支援パターンの組み合わせ毎に、評価者 10 名分の評価点平均を求めた結果である。

0HOP の場合は、パターン A(動画象のリアルタイム伝送)に対する 2 つの評価項目がいずれも最高値(2)を示しており、パターン B(静止画像の共有)についても遅延を気にする評価者がほとんど居なかったことがわかる。また 1HOP は、0HOP に比べれば評価値が若干低下しているものの、遠隔医療支援を阻害するような遅延ではないことが示されている。2HOP は、パターン A において遠隔医療支援の可否に対する評価点平均が 1 を越えているため、辛うじて遠隔医療支援が可能であるとの判断をすることはできるが、パターン B ではそれが困難であると考えられる。また、0HOP や

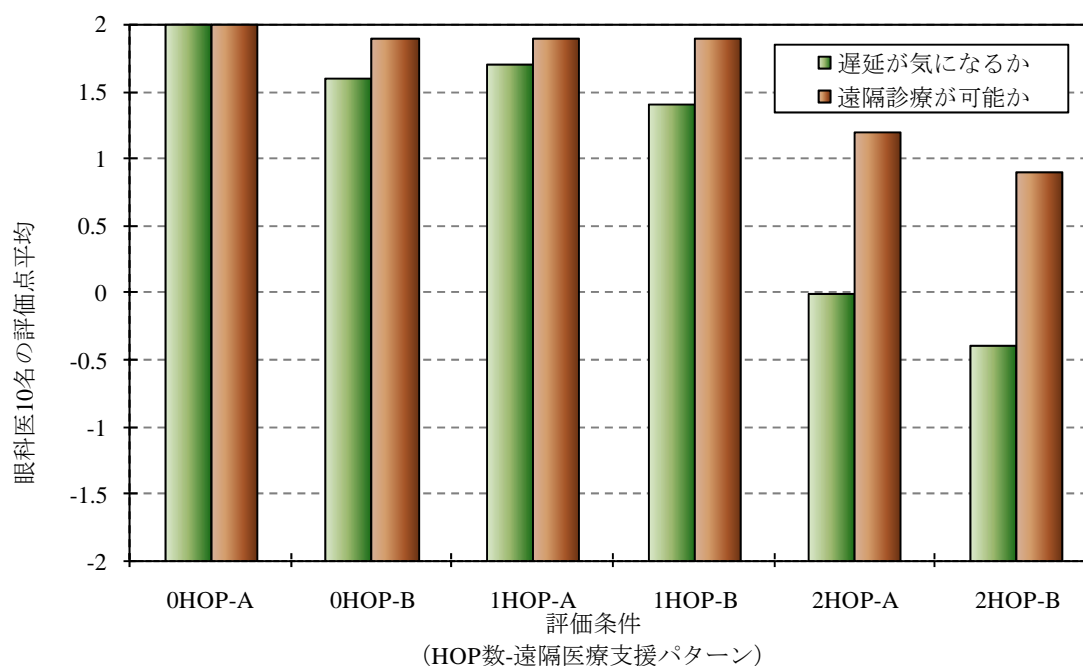


図 4.14 評価結果

1HOP に比べて遅延を気にする評価者が多く存在していたことがわかる。

以上のことから、0HOP および 1HOP については遅延が遠隔医療支援に与える影響はほとんど無いこと、また 2HOP で生じる遅延が遠隔医療支援を阻害する可能性があることを明らかにした。

4.3.3 考察

本実験では、遠隔医療支援システムの TV 会議機能や描画機能を使用して、0HOP、1HOP、2HOPそれぞれの伝送遅延がユーザに与える心理的影響と遠隔医療支援の可否を主観的に評価したが、伝送遅延時間の測定結果から予測した通り、0HOP や 1HOP では何ら問題にはならないが、2HOP では伝送遅延を気にするユーザが多く、また円滑な遠隔医療支援を行うことも難しいことが明らかとなった。すなわち、衛星インターネットの利用を前提とする遠隔医療支援では、2HOP における伝送遅延時間をどれだけ低減させられるかが重要な課題となる。以上の結果を踏まえて、以降では 2HOP に限定した伝送遅延低減方法について検討した。

4.4 2HOP環境に限定した伝送遅延低減方法の検討

4.2項では、遠隔医療支援システムのTV会議機能における伝送遅延時間を通信経路別に測定し、2HOPの環境において遅延時間が問題となりうることを示した。2HOPは、図4.2(a)で示したように拠点間を衛星回線のみで接続する方法であり、有線系ブロードバンド回線を利用できない医療機関同士が遠隔医療支援を行う場合に必須となる通信環境である。このような地方間での遠隔医療は、本学が支援側となる通常の遠隔医療に比べれば実施頻度は少ないが、状況によっては本学を含む三者間での通信が必要となることもあり、地方同士を結ぶ2HOPと、地方・本学を結ぶ1HOPが混在した環境で三元遠隔医療支援を行うケースも生じる。このように、2HOPによる遠隔医療は1HOPや0HOPに比べて利用頻度が少ないものの、医療の均てん化を図るという観点においては重要な役割を担っていることから、伝送遅延に対する問題の解決が重要となる。以上のような背景のもと、本項では2HOP環境に限定した伝送遅延低減方法について検討を行った。

4.4.1 TV会議機能における2回線併用方式の提案

伝送遅延を低減させるためには、その発生要因を明確にし、個々の要因で生じる遅延時間を抑制することが必要となる。しかし、通信に起因する遅延や映像・音声の圧縮処理等で発生する処理遅延を技術的に抑制することは容易なことではなく、それが実現できたとしても大幅な改善は期待できないことから、現実的な対応策とは言えない。一方、映像と音声の双方向リアルタイム通信を実現するアプリケーションでは、音声を途切れることなく通信させることが必須要件と言われており、通信帯域が不足した場合でも音声を優先的に伝送(帯域制御)できる機能を装備するものが多い。すなわち、円滑なコミュニケーションを行うためには映像よりも音声に対する品質(遅延、音質など)の保証を優先させることが重要と考えられている。これは、遠隔医療支援システムのTV会議機能にも通用するものであるため、音声通信に必要な帯域を優先的に割り当てるなどの工夫をすれば実用性のさらなる向上が期待できる。ただし、2HOP(衛星回線)を利用する限りにおいては、帯域制御によって音質の保証はできても遅延の問題を解決することはできない。そこで、映像については衛星回線(2HOP)をそのまま利用し、音声・描画情報については衛星回線よりも遅延が少ない別の回線を利用して通信する2回線併用方式を提案した(図4.15)。これにより、音質の保証と遅延時間の低減化を両立させることができる。また、実際の運用ではTV会議機能で会話をしながら画像描画機能でマーキングした情報を医師間で共有するため、描画情報も音声と同じ回線で伝送することにより両者間における同期性の確保を実現した。以降では、提案方式を遠隔医療支援システムへ実装するまでの過程を説明する。

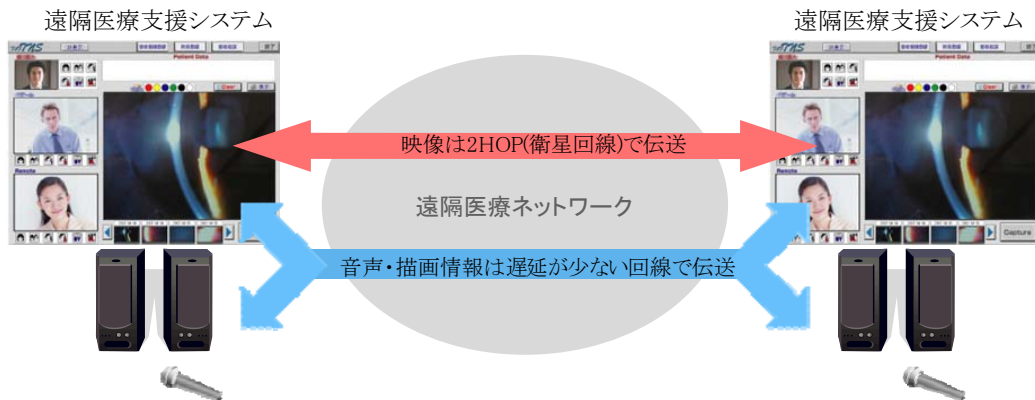


図 4.15 2 回線併用方式の概念図

(1) 音声・描画情報の通信回線の選定

提案方式を実現するためには、音声および描画情報の伝送に用いる通信回線を選定することが先決となる。本研究の場合、次の 4 つの条件を満たしているかどうかを選定基準となる。

- ① 2HOP に比べて伝送遅延時間が短いこと。
- ② 有線系ブロードバンド回線が整備されていない地域でも利用可能であること。
- ③ 通信サービスの提供エリアが広いこと。
- ④ 音声通信に必要な帯域が利用可能であること。

これらの条件を全て満たし、かつ衛星回線よりも低コストで運用できるサービスとして、モバイル網に接続する「データ通信サービス」がある。このサービスには、パケット交換網を利用するものと回線交換網を利用するものの 2 タイプが存在する。どちらのタイプでも提案方式を実現することはできるが、通信帯域や伝送遅延については異なる性質を持っているため、提案方式に適したタイプを選定する必要がある。まずパケット交換網は、回線交換網に比べて広帯域の通信サービスが提供されており、今後のさらなる高速化も期待できる。その反面、パケット分割したデータをバケツリレー方式で相手先へ届けるため、伝送途中の遅延が大きくなる。一方の回線交換網は、利用できる通信帯域が 64 kbps に制限されるという制約はあるものの、相手先までの通信経路を占有してデータを直接届けることができるため、パケット交換網に比べて遅延時間は大幅に短くなり、また遅延時間が安定するという利点を持っている。そのため、帯域の制約は受けるものの、伝送遅延の観点から判断すれば 2HOP に替わる通信回線にはデータ通信サービスにおける回線交換網の利用が適していると言える。以上を踏まえ、提案方式では NTTドコモが提供する FOMA 回線交換網(以降、FOMA 網と呼ぶ)を採用することとした。

(2) 遠隔医療支援システムの改修

図 4.16 で示すように、映像と音声を同一の通信回線で伝送するように設計されている従来の遠隔医療支援システムに、今回新たに開発した「FOMA 音声通信ソフトウェア」を COM インタフェースで結合し、映像(2HOP)と音声・描画情報(FOMA 網)を別々に伝送できるように改修した。各モジュールの機能は以下の通りである。

(a)映像伝送モジュール[既存]

CCD カメラから入力した映像をリアルタイムに符号化(復号)・伝送するためのモジュール。通信回線は従来のまま 2HOP(衛星回線)を使用。

(b)音声伝送モジュール[既存]

改修以前は本モジュールが音声をリアルタイム伝送していたが、今回の改修により、「FOMA 音声通信ソフトウェア」で音声を伝送する仕様としたため、本モジュールは未使用。

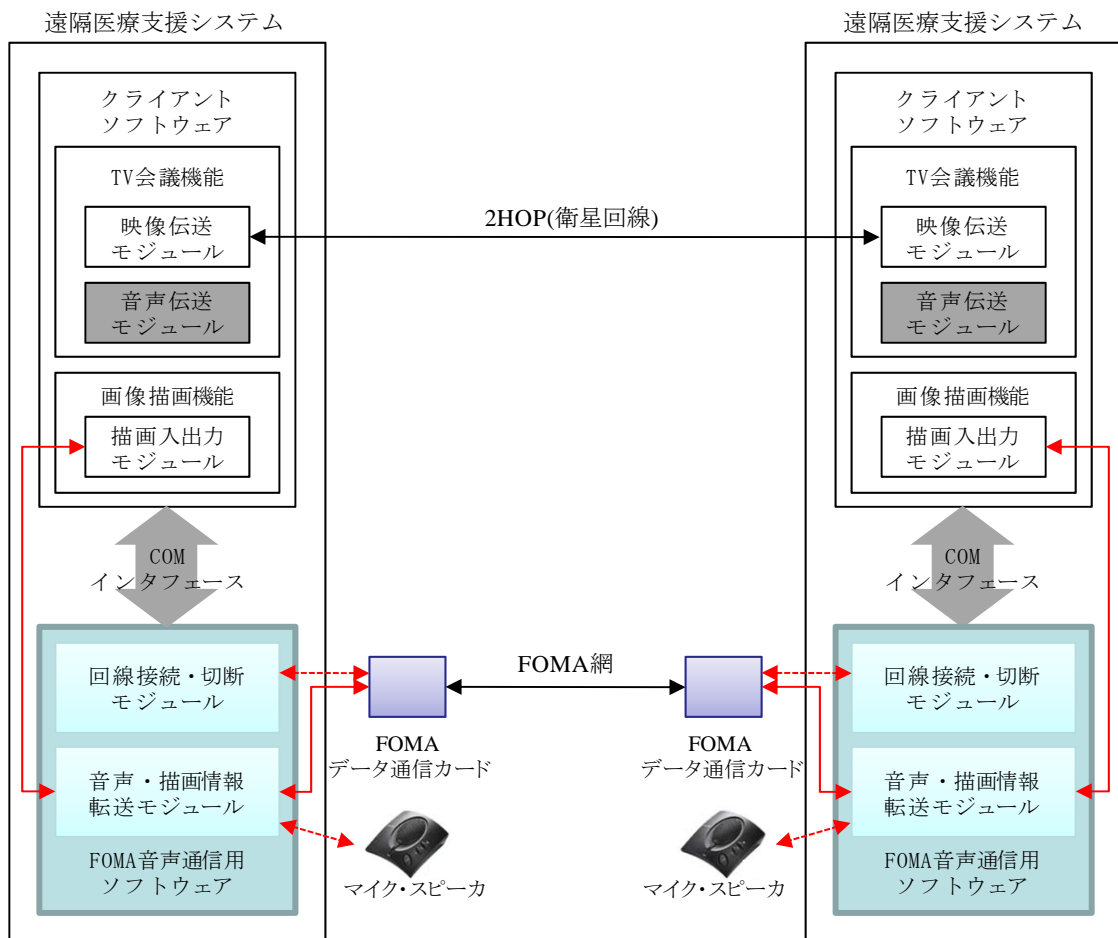


図 4.16 機能拡張した遠隔医療支援システムの構成

(c)描画入出力モジュール[既存]

タッチペン等で入力したポインティング座標情報(描画情報)を読み取り、自端末の画面上で図形を描画するとともに、ポインティング座標情報を相手端末へ伝送するモジュール。今回の改修により、描画処理は本モジュールで行い、ポインティング座標情報の伝送は「FOMA 音声通信用ソフトウェア」が行うように設計。

(d)回線接続・切断モジュール[新規]

FOMA データ通信カードに対して、接続・切断要求を行うためのモジュール。遠隔医療支援を行う相手先が決定した時点で自動的に接続を行う。また、遠隔医療支援を終了した際に自動的に回線切断を行う。

(e)音声・描画情報転送モジュール[新規]

既存のモジュールから入力した音声信号ならびにポインティング座標情報を FOMA 網を使用して相手端末へ伝送するためのモジュール。音声信号については、本モジュールで符号化ならびに復号を行う。

4.4.2 客観的評価に基づく有効性の検証

ここでは、FOMA 網を利用して音声を伝送した際の遅延時間が、2HOP(衛星回線)で伝送した場合よりも短縮されているかどうかを確認するため、4.2 項と同様の実験方法によって伝送遅延時間の測定を行った。

(1) 測定方法

図 4.17 で示すように、遠隔医療センターの送信用システムから送信した音声データを遠軽厚生病院のルータで受信し、そのデータを同病院内のシステムには転送せずに、そのまま折り返して遠隔医療センターの受信用システムへ送信できる通信環境を用意した。ただし、遠隔医療センターに設置した 2 台のシステムはいずれも提案方式を実装した改修版である。また、送信用システムから遠軽厚生病院内のルータまでは FOMA 網で接続し、同ルータから受信用システムまでは B フレッツ回線によって転送している。

この通信環境で送受信した音声を、図 4.4 と同じ方法で録音し、送信用システムから音声を送信した時間と受信用システムで音声を受信した時間の差を Audacity によって解析した。

(2) 測定結果

連続して 10 回の測定を行った。その結果を表 4.6 に示す。なお、同表では比較対象として 4.2

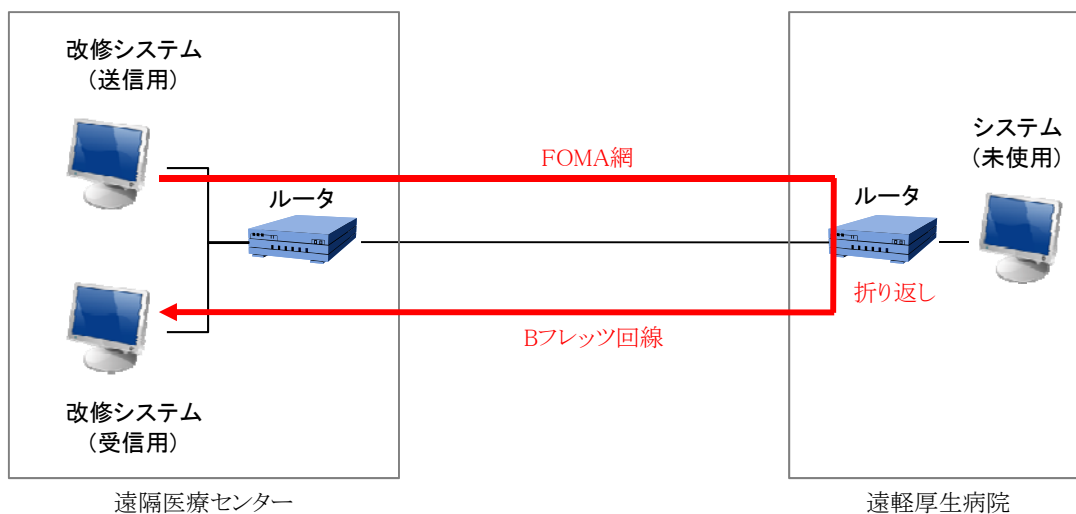


図 4.17 伝送遅延時間測定のための通信環境

表 4.6 FOMA 網を用いた際の伝送遅延時間 (msec)

回数	2HOP	FOMA
1	1706.33	956.37
2	1706.33	957.69
3	1706.33	957.69
4	1706.33	956.07
5	1706.33	957.69
6	1706.33	957.69
7	1706.33	956.07
8	1706.33	957.69
9	1706.33	947.95
10	1706.33	947.95
平均	1706.33	955.28

項で測定した 2HOP の伝送遅延時間も示す。

測定の結果、2HOP における伝送遅延時間が 1706 msec であるのに対し、FOMA 網を用いた場合はその約 55 % まで低減されることがわかった。このことから、提案方式の有効性が証明された。

4.4.3 主観的評価に基づく有効性の検証

4.4.2 項で実施した客観的評価に続き、2HOP と FOMA 網を併用した提案方式が 2HOP のみを
 利用する場合に比べて主観的な評価が向上されるかどうかを確認するため、4.3 項と同様の実験
 を行った。

(1) 評価方法

表 4.2 で示した 10 名の眼科医を評価者とした。また、2 名の眼科医を一組とし、眼科医歴の短い
 医師を支援依頼側、経験の長い医師を支援側とした上で、組毎に評価を実施した。

各組は、(A)動画像のリアルタイム伝送に基づく遠隔医療(図 4.7)と、(B)静止画像の共有に基づ
 く遠隔医療(図 4.9)を 1 回ずつ体験し、各パターンにおいて伝送遅延が気になったかどうか、遠隔
 医療支援が可能であったかどうかを 5 段階評価尺度(表 4.4 と表 4.5)に従って判定した。ただし、TV
 会議機能による動画象伝送には 2HOP を利用し、同機能の音声伝送と描画機能の描画情報につ
 いては FOMA 網を利用した。また、パターン B については、図 4.18 に示す静止画像をダウンロー
 ドの対象とし、その画像に対応するシナリオを図 4.19 とした。

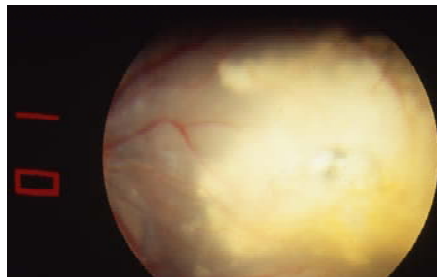


図 4.18 パターン B においてサーバからダウンロードした静止画像

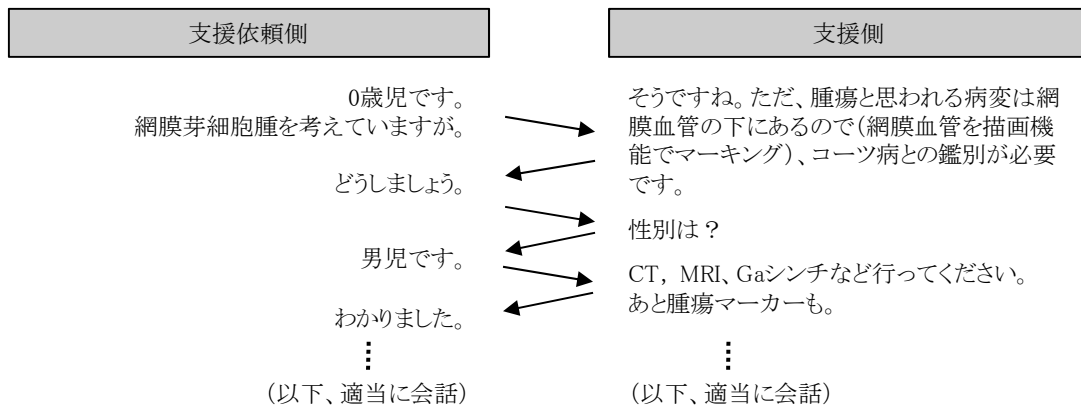


図 4.19 パターン B のシナリオ

(2) 評価結果

図 4.20 は、4.3 項で実施した従来方式(2HOP)の主観評価結果と提案方式(2HOP+FOMA 網)に対する主観評価の結果を並列したものである。ただし、評価者 10 名分の評価点平均で表している。この結果から、提案方式における伝送遅延の心理的影響および遠隔医療支援の可否に対する評価が、従来方式に比べて向上していることがわかる。特に、音声を FOMA 網で伝送することにより、伝送遅延を気にする評価者が大幅に減少していることが伺える。このことから、主観的評価においても提案方式の有効性が証明された。

4.5 まとめ

本研究では、衛星インターネット環境下における伝送遅延時間を測定し、衛星回線を利用しない 0HOP や 1 つの衛星区間を経由する 1HOP に比べて、2 つの衛星区間を経由する 2HOP の伝送遅延が大幅に長くなることを明らかにした。また、伝送遅延がユーザに与える心理的影響と遠隔医療支援の可否についても評価し、2HOP では円滑な遠隔医療支援を阻害する可能性があることを示した。さらに、2HOP に限定した伝送遅延低減対策として、動画像を 2HOP、音声および描画情報を FOMA 網で伝送する 2 回線併用方式を提案し、客観的・主観的評価によって提案方式の有効性を証明した。今後は、提案方式を含めた遠隔医療ネットワークの再構築を行い、より多くの医療機関が支援を受けられる遠隔医療支援体制を構築する。

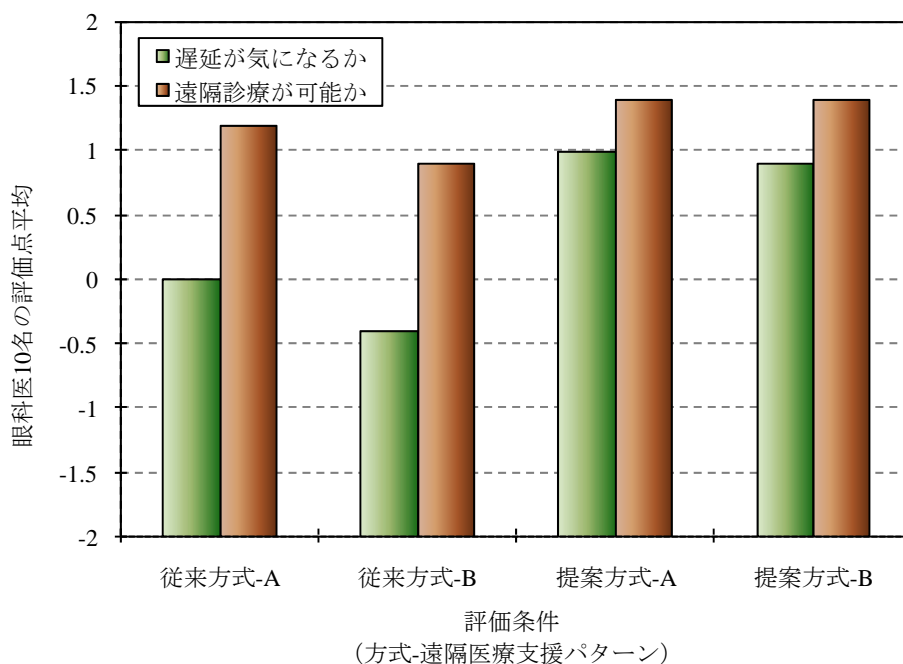


図 4.20 評価結果(従来方式との比較)

5 研究開発のまとめ

本研究では、医療の均てん化を実現するための遠隔医療ネットワークの構築を目的として、平成19年度から平成20年度までの2カ年で、衛星インターネットを利用した離島僻地向け遠隔医療支援に関する研究開発を行った。具体的には、衛星回線とインターネット網を併用する衛星インターネット環境において、安全かつ効果的な遠隔医療が実施できるように、平成19年度はセキュリティ対策、平成20年度は画像・音声品質の保証ならびに伝送遅延対策について重点的に検討を進めた。各年度における研究開発成果を以下で述べる。

5.1 平成19年度の研究開発成果

平成19年度は、衛星インターネットをベースとする遠隔医療ネットワークの構築、ならびにセキュリティ対策に関する研究開発を行った。セキュリティ対策では、モバイル網が衛星回線に比べて安全性が高いことに着目し、携帯電話を利用者認証に用いる新しいセキュリティ方式を確立した。さらに、同方式を採用したモデルシステムとして診療情報閲覧システムを開発し、利用者の資格に応じて電子カルテの開示範囲を制御する仕組みや、非接触型ICカード技術であるFeliCaを利用した再認証機構も提案した。これらの有効性を、医療従事者を評価者とする主観評価実験で評価し、7割以上の医療従事者から有効な方式であるとの評価を得ることができた。以上の成果により、正当性が証明された特定の利用者が安心して衛星インターネットを利用できる環境が構築できた。

5.2 平成20年度の研究開発成果

平成20年度は、前年度に構築した衛星インターネット環境と本学が従来から使用している遠隔医療支援システムを用い、動画像および音声の品質保証方法、ならびに伝送遅延対策について研究開発を行った。伝送品質の保証方法については、遠隔医療支援システムでリアルタイム伝送した眼科医療動画像と音声の実用品質で再生されるかどうかを確認するための客観評価実験・主観評価実験を行い、音声の実用可能な品質で伝送されていること、また眼科医療動画像については衛星回線の帯域不足に起因して品質が保証できない場合があることを確認した。さらに、医療動画像の伝送品質を改善するため、H.264 動画像符号化方式における連続ピクチャ間でのビット量の平均化方法を提案した。伝送遅延対策については、まず現状の伝送遅延時間を確認するため、遠隔医療支援システムのTV会議機能を用いて音声のリアルタイム伝送を行った場合の遅延時間を測定した。その結果、衛星回線を利用しないOHOPや1つの衛星区間を経由する1HOP

に比べて、2つの衛星区間を経由する2HOPの伝送遅延が大幅に長くなることを明らかにした。次に、伝送遅延がユーザに与える心理的影響と遠隔医療支援の可否を確認するために眼科医を評価者とする主観評価実験を行い、2HOPにおいて円滑な遠隔医療支援を阻害する可能性があることを示した。以上の結果を踏まえ、2HOPに限定した伝送遅延低減対策を検討し、動画像を衛星回線(2HOP)、音声および描画情報をFOMA網で伝送する2回線併用方式を提案し、客観的・主観的評価によって提案方式の有効性を証明した。

おわりに

本研究成果によって、DSL や光ファイバなどの高速ブロードバンド回線が整備されていない地域においても、衛星インターネットを利用することで効果的な遠隔医療支援を実施することが可能となるが、今後のインフラ整備の進展度合いによっては衛星インターネットに対する需要が低下することも考えられる。特に、NGN(Next Generation Network)^[24]が普及すれば、網内における安全性や品質保証が約束された通信経路を簡単に利用できるようになる。また、携帯電話の普及に伴ってモバイル網のサービスエリアも急速に拡大しており、近年では山間僻地がサービス圏内であることもめずらしくない。こうした動向を考慮すると、通信帯域の制約や伝送遅延などの諸問題を抱える衛星回線を使用する必要性は徐々に低下していくことが予想される。そのため、今後は衛星回線のみならず、NGN やモバイル網などの様々な通信インフラが混在した遠隔医療ネットワークを構築することが必要であり、どのような通信環境であっても全ての医療機関が常に安定した品質でコミュニケーションを行える環境を作ることも重要な課題である。

参考文献

- [1] JSAT 株式会社:“JSAT、旭川医科大学と衛星を活用した遠隔医療の共同実験を開始 ～離島など通信条件が不利な地域での遠隔医療を支援～”, http://www.sptvjsat.com/newsJSAT/news_pdf/060509_JS_asahikawa.pdf
- [2] 吉田晃敏, 伊達貴彦, 佐々木春光, 山口享, 高野了滋, 石子智士, 加藤祐司, 籠川浩幸, 亀山大希, 山上浩志, 廣川博之:“衛星インターネットを用いた過疎地・離島遠隔医療”, 日本遠隔医療学会雑誌, vol.2, no.2, pp.162-163, 2006.
- [3] 三上大季, 林弘樹, 守屋潔, 山上浩志, 吉田晃敏:“携帯電話による安全性の高い利用者認証が可能な遠隔医療用通信インフラシステムの開発と評価”, 日本遠隔医療学会雑誌, vol.4, no.2, pp.273-274, 2008.
- [4] Sony Japan FeliCa ホームページ:<http://www.sony.co.jp/Products/felica/>
- [5] スカパーJSAT 株式会社:<http://www.sptvjsat.com/>
- [6] ITU-T Recommendation. H.264:“Advanced Video Coding for generic audiovisual services”, 2003.
- [7] ISO/IEC 14496-10:“Coding of audiovisual objects - Part 10: Advanced Video Coding”, 2003.
- [8] ITU-T Recommendation. H.262 IS :“Information technology-Generic coding of moving pictures and associated audio information :Video.”, 2000.
- [9] ISO/IEC 14496-2:”Information technology - Coding of audio-visual objects - Part 2:Visual”, 2001.
- [10] 大久保栄, 角野眞也, 菊池義浩, 鈴木輝彦:“改訂版 H.264/AVC 教科書”, 株式会社インプレス, 2006.
- [11] 林弘樹, 畠山修東, 三田村好矩, 下野哲雄, 吉田晃敏, 廣川博之, 山上浩志, 藤尾直樹, 小笠原博宣, 引地泰一, 佐藤健一, 五十嵐羊羽, 花田一臣, 入江宏之, 羽山繁, 山内真樹:“ROI を用いた高精細眼科医療画像の圧縮法に関する検討”, 信学技報, MBE-2002-21, pp.25-28, 2002.
- [12] 株式会社 K-WILL:http://www.kmw.co.jp/index_03.html
- [13] Recommendation ITU-R BT.500-6:“Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures”, 1994.
- [14] Peebles Jr., P.Z. :“Probability, Random Variables, and Random Signal Processing”, McGraw-Hill, 1980.

- [15] Recommendation ITU-R BT.1122-1 : “User requirements for emission and secondary distribution systems for SDTV, HDTV and hierarchical coding schemes”, 1995.
- [16] NTI-アコースティックアナライザ「Acoustilyzer AL1」:<http://www.nti-audio.com/Home/Products/Minstruments/AcoustilyzerAL1/tabid/60/Default.aspx>
- [17] IEC 60268-16:Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index
- [18] TTC 標準 JJ201.01: “IP 電話の通話品質評価法”, 2008.
- [19] ITU-T Recommendations G.107: “The E-model: a computational model for use in transmission planning”, 2008.
- [20] ITU-T Recommendations G.711: “Pulse Code Modulation(PCM) of Voice Frequencies”, 1988.
- [21] ITU-T Recommendations G.726: “40, 32, 24, 16 kbit/s Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM)”, 1990.
- [22] M. R. Schroeder and B. S. Atal: “Code-excited linear prediction (CELP) : High-quality speech at very low bit rates,”, Proc. ICASSP-85, vol.25, no.1, pp.937-940, 1985.
- [23] Audacity :<http://audacity.sourceforge.net/>
- [24] NGN :<http://www.ntt-east.co.jp/ngn/>

外部発表実績

- [1] 山上浩志, 吉田晃敏, 佐々木春光, 亀田冬樹, 伊藤広美, 廣川博之: “離島における遠隔医療通信インフラに関する研究 –回線サービス提供の実態調査と利尻・礼文島でのインフラ構築–”, 日本遠隔医療学会雑誌, vol.4, no.2, pp.269-270, 2008.
- [2] 三上大季, 林弘樹, 守屋潔, 山上浩志, 吉田晃敏: “携帯電話による安全性の高い利用者認証が可能な遠隔医療用通信インフラシステムの開発と評価”, 日本遠隔医療学会雑誌, vol.4, no.2, pp.269-270, 2008.
- [3] 山上浩志, 吉田晃敏, 林弘樹, 守屋潔, 三上大季, 廣川博之, 石川冬樹, 吉岡信和, 堀内賢一, 劉亜斌, 中島啓一: “医療情報共有のための新しいセキュリティ基盤システムの開発”, 医療情報学, vol.28(Suppl.), pp.365-368, 2008.