

低遅延でインタラクティブなゼロ レイテンシー映像・Somatic 統合 ネットワーク

甲藤二郎

早稲田大学理工学術院基幹理工学部情報通信学科

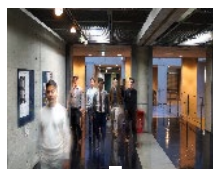
概要

背景

- 無線回線を介したオンライン会議、カメラ監視システム、遠隔操作システムなどの重要性が高まっている。
 - ✓ テレワーク、オンライン授業、監視システム、遠隔医療、オンラインゲーム、遠隔ロボット操作、遠隔機械操作、等
- しかし、従来の無線通信では、伝送遅延やサーバ処理遅延などにより、リアルタイム性に課題があった。
 - ✓ Web会議では250ミリ秒以上の遅延
 - ✓ Somatic情報（動作情報、体性感覚）では数ミリ秒の遅延に抑えたい
- そこで本研究開発では、映像・Somatic統合情報の、アプリケーション処理時間を含めて数ミリ秒の超低遅延伝送を支える技術開発を行うと共に、未来予測の導入によるゼロレイテンシー伝送の実現を目指す。

本研究開発の概要

1. 映像・Somatic統合



映像予測

映像・Somatic統合
評価手法確立



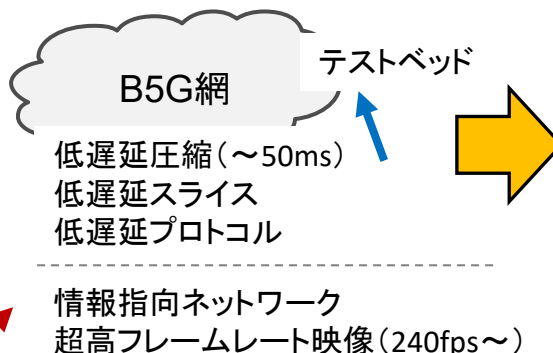
Somatic予測

体性感覚計測
体性感覚呈示

- ・ 代表研究者・研究分担者の研究開発実績
- ・ オープンソース・オープンデータの有効活用

関連分野：
(2-2) 高精度時空間同期基盤技術
(7-12) 超臨場感技術
(6-1) ネットワークの自律・分散・協調制御
(7-13) ロボティクス
(2-3) ネットワーク内コンピューティング

2. 超低遅延ネットワーク



◎ アウトカム

学術貢献（学術論文・国際学会）
知財化・国際標準化（ITU、ISO/IEC、IETF等）
オープンソース・オープンデータ
広報活動・デモンストレーション（報道発表、展示会、大阪万博）
市場展開・社会実装

3. 統合実証試験



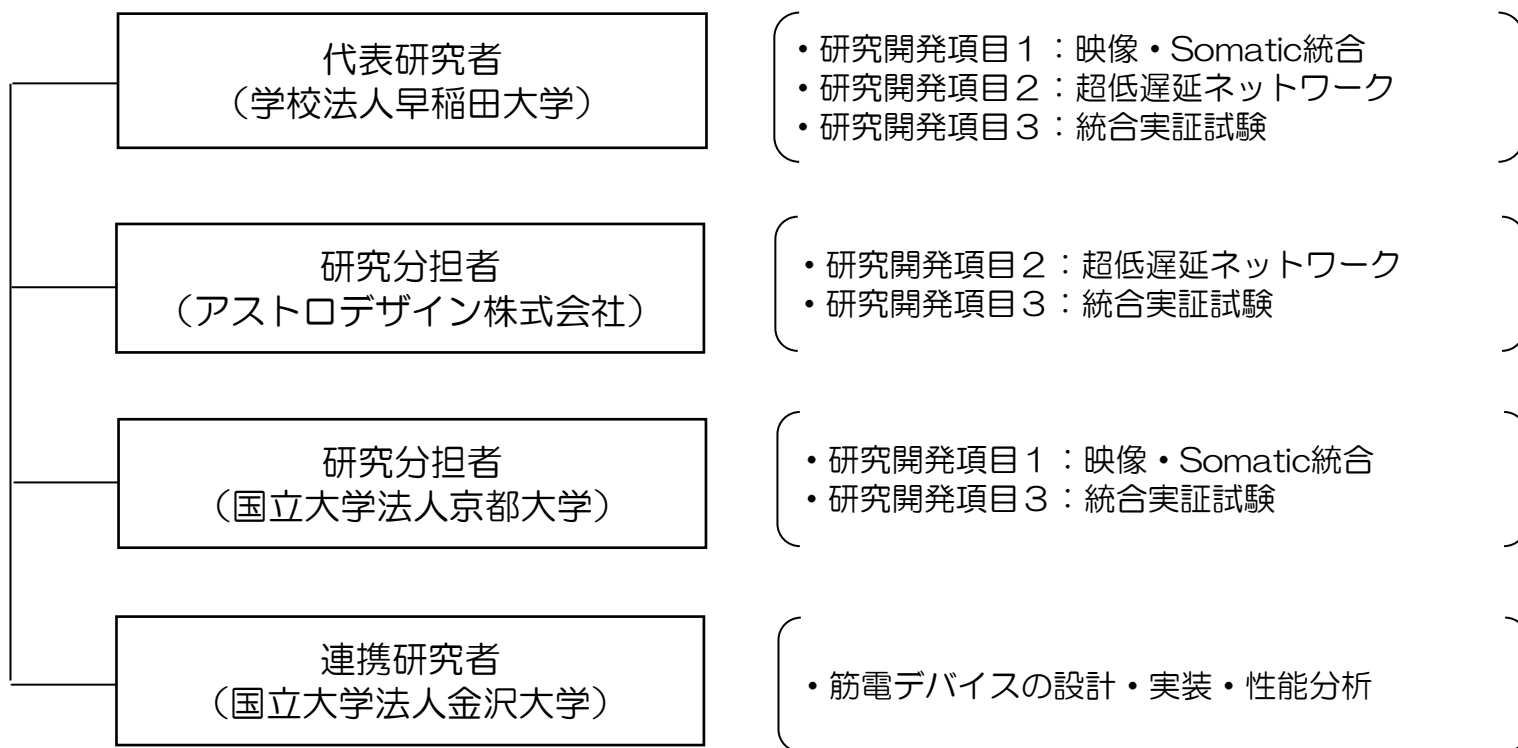
◎ ゼロレイテンシーネットワーク

テレワーク、オンライン授業、監視システム、遠隔医療、オンラインゲーム、遠隔ロボット操作、遠隔機械操作（含自動運転）

高齢者・障害者の遠隔サポート、自動運転における衝突回避機能の性能改善、スマートシティにおける安心安全応用

◎ 電波の有効利用

研究開発体制



研究開発項目

■ 研究開発項目1 映像・Somatic統合

✓ 研究開発項目1-a) Somatic情報伝送

(京都大学)

✓ 研究開発項目1-b) 映像予測

(早稲田大学)

■ 研究開発項目2 超低遅延ネットワーク

✓ 研究開発項目2-a) 低遅延ネットワーク管理

(早稲田大学)

✓ 研究開発項目2-b) 圧縮伝送方式

(アストロデザイン株式会社)

✓ 研究開発項目2-c) 次世代技術

① 情報指向ネットワーク

(早稲田大学)

② 超高フレームレート映像伝送

(早稲田大学)

■ 研究開発項目3 統合実証実験

✓ 研究開発項目3-a) 遠隔サービス

① 遠隔リハビリ

(京都大学)

② 遠隔作業

(早稲田大学)

✓ 研究開発項目3-b) 圧縮伝送・表示装置

(アストロデザイン株式会社)

✓ 研究開発項目3-c) 統合実証実験

(早稲田大学)

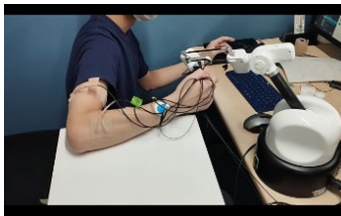
項目詳細

1-a) Somatic情報伝送

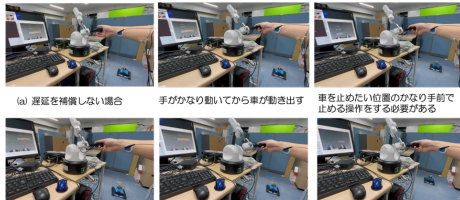
- 筋電位と力覚の計測・伝送・呈示を行う環境整備を行った
- LSTMを用いたSomatic情報の未来予測方式の提案を行い、500ms程度まで未来予測が有効に機能することを示した
- リモコンカーを用いた遠隔操作システムの試作を行い、200～300msの伝送遅延環境下における未来予測の有効性を実証した

■ 作業内容

- 筋活動の計測、力覚の計測・呈示を行う環境整備と伝送システムの設計
- 深層学習を用いたSomatic情報の未来予測方式の開発
- 計測・伝送システム試作と有効性実証



Somatic情報の計測



遠隔操作システムの作成と評価

■ 最終目標と達成度

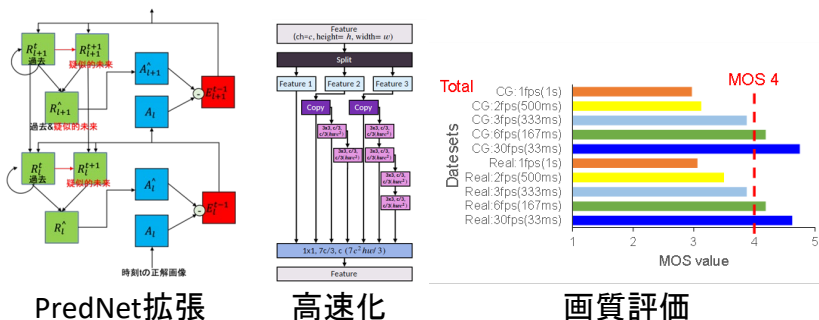
- ✓ 筋電位計測デバイスを用いた筋電位計測と、ハプティクスデバイスを用いた力覚の計測・呈示を行う環境整備を行った
- ✓ 姿勢と筋活動を計測しながらSomatic情報を予測する手法を提案し、その有効性と適用条件を明らかにした
- ✓ 計測・伝送システムの設計を行うと共に、遠隔操作システムの試作を行い、遅延補償の有効性を明らかにした
- ✓ 【課題】 発展課題として、より複雑な人間の動作予測に向けた知見の整理を行った

1-b) 映像予測

- 深層学習を用いた映像予測方式の調査と提案を継続的に進め、PredNet 拡張やフレーム外挿による映像予測アルゴリズムの開発と評価を行った
- 映像予測とSomatic情報を統合しゼロレイテンシー伝送に応用するためのシステム要件を明らかにした
- PredNet やフレーム外挿による映像予測の実時間実装を行い、ゼロレイテンシー伝送のプロトタイプを作成した

■ 作業内容

- 映像予測の調査と方式検討(未来予測精度、画質、演算量等)
- 成果発表と特許出願
- 実時間動作の実現とプロトタイプ実装



■ 最終目標と達成度

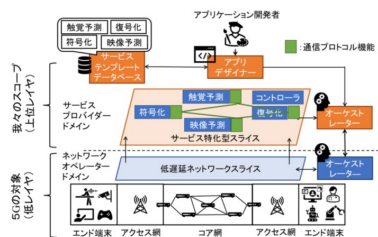
- ✓ 映像予測の調査、方式提案、実時間実装まで、一通りの作業を完了した
- ✓ 映像予測を通信応用(ゼロレイテンシー応用)するための画質評価やSomatic情報と統合するためのシステム検討を完了した
- ✓ 学会等で成果発表を行うと共に、1件の特許出願を行った
- ✓ 【課題】映像予測は毎年のSOTA更新が続けられており、継続的な調査が必要

2-a) 低遅延ネットワーク管理

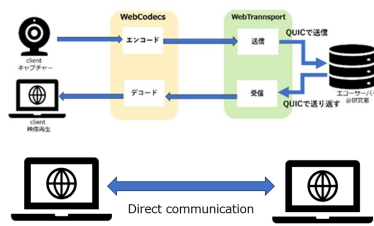
- 深層学習による映像処理をネットワーク内分散処理によって実行し、低遅延処理を実現するための通信条件を検証した(ネットワーク仮想化)
- ローカル環境、テストベッド、実ネットワークそれぞれで各種の通信実験を実行し、低遅延伝送に向けた通信用件を明らかにした
- 低遅延指向の複数の通信サービスの検証実験を進めた

■ 作業内容

- 仮想化環境を想定したネットワーク内分散処理の方式検討
- ローカル5G網、商用5G網に加え、NICT総合テストベッドを含むテストベッドの整備と低遅延通信の評価実験の実施



低遅延スライスと分散処理



低遅延映像配信実験

■ 最終目標と達成度

- ✓ ネットワーク内分散処理の方式検討と評価実験を完了した。ただし、実ネットワークにおける低遅延スライスは実現できなかった
- ✓ 各種の実ネットワーク(ローカル網、テストベッド、商用5G網)において、低遅延通信の評価実験を完了した
- ✓ 低遅延伝送に必要なプロトコル評価を完了し、学会における成果発表と特許出願を行った
- ✓ 【課題】低遅延スライスの実装

2-b) 圧縮伝送方式

- 圧縮映像と非圧縮音声の多重化伝送が可能な機器(圧縮伝送装置)の選定を行った
- 圧縮伝送装置による伝送機能と遅延特性の計測を行い、約50msの遅延として、映像と音声の低遅延同期伝送が可能なことを確認した
- NICT総合テストベッドを用いたRTP伝送評価実験を行った

■ 作業内容

- 映像とSomatic情報の多重化伝送が可能な圧縮伝送装置の選定
- 圧縮伝送装置の遅延特性の計測
- テストベッドを用いた伝送評価実験



伝送実験の様子



遅延特性の計測

■ 最終目標と達成度

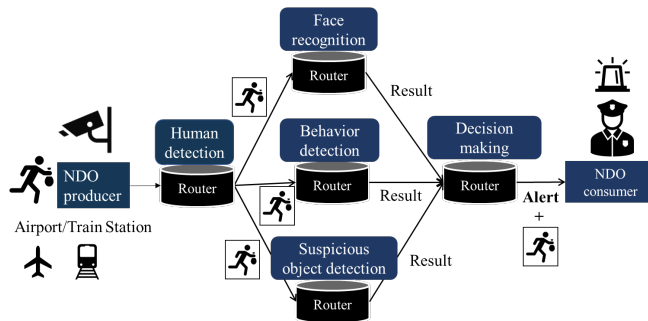
- ✓ 8K 映像の HEVC 圧縮と非圧縮音声 (Somatic情報で入替え可能)の多重化伝送が可能な伝送装置の選定を行った
- ✓ 圧縮伝送装置の遅延特性の計測を行い、約50msの遅延の安定動作を確認した
- ✓ NICT総合テストベッドを用いた、圧縮映像と非圧縮音声のRTPパケットによる伝送実験を行った

2-c) 次世代技術 ① 情報指向ネットワーク

- Information Centric Network(ICN)を基盤としたネットワーク内データ分散処理の自動構築につき、基本枠組み設計を完了した
- 方式実現のためにICN ノードの上位に実行補助層の設置を提案し、基本構成の設計を完了した
- 例題として分岐・合流を含む分散処理につき、プロトコルの正当性につき論理検証を行った
- 成果につき、ITU-Tの関連勧告ITU-T Y.3073の修正を提案し、勧告化された

■ 作業内容

- ICN(CCN/NDN)を基本とした枠組み設計
- ノードに対する処理指示コマンドの設計
- ノード上位の処理実行補助層の構造設計
- 処理例(下図のような形態)によるプロトコル論理検証



- 処理例を基盤としたITU-Tの勧告への成果盛り込み

■ 最終目標と達成度

- ✓ システム設計については、基盤部分は完成。
- ✓ 処理補助層のプロトコルの一部を用いた実装実験を行い、遅延短縮を確認。
- ✓ ITU-T勧告については、Y.3037の修正議論開始提案、成果の主点を盛り込んだ計7件の寄書提案、また修正勧告のエディターを務めて承認に至った。

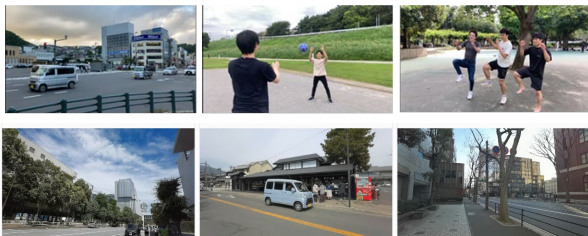
ITU-T勧告化完了

2-c) 次世代技術 ② 超高フレームレート映像伝送

- 240fps映像データセットを作成し、各種の画像処理アルゴリズム(未来予測、フレーム内挿、超解像、デブラーリング)の開発と共に国際学会で成果発表を行い、オープンデータとして公開した。
- 960fps映像データセットを作成し、各種の画像処理アルゴリズムの開発も行い、高フレームレート映像に適した超解像に関する特許1件の出願を行った。
- テストベッド上の960fps映像の伝送実験を行った。

■ 作業内容

- 240fpsと960fpsの高フレームレート映像データセットの作成
- 高フレームレート映像のための各種画像処理アルゴリズムの検討
- 高フレームレート映像のネットワーク上の圧縮伝送実験



高フレーム映像データセットの作成

■ 最終目標と達成度

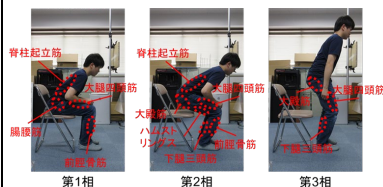
- ✓ 240fps映像データセットを作成し、画像処理アルゴリズムの開発も行い、国際学会で成果発表を行うと共に、オープンデータとして公開した
- ✓ 960fps映像データセットを作成し、高フレームレート映像における超解像アルゴリズムの問題点を指摘し、改善方式の特許出願を行った
- ✓ 高フレームレート映像の圧縮を行い、テストベッド上の伝送実験を行った
- ✓ 【課題】960fps映像データセットに関する国際学会発表

3-a) 遠隔サービス ① 遠隔リハビリ

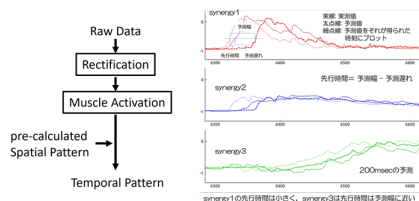
- 立ち上がりと座り込みの動作の機序の分析を行い、筋電位計測から筋シナジーの推定が可能になることを示した。
- LSTMを用いた筋電位からの筋シナジーの未来予測手法を開発した
- 遠隔リハビリの基本機能を対象として、動作・姿勢予測による遅延補償の有効性を実証した

■ 作業内容

- リハビリの基本動作である立ち上がり・座り込み動作の分析
- 深層学習を用いた筋電値からの筋シナジー予測、および動作・姿勢予測
- 動作・姿勢予測による遅延補償



立ち上がり動作の分析



筋シナジーの推定と未来予測

■ 最終目標と達成度

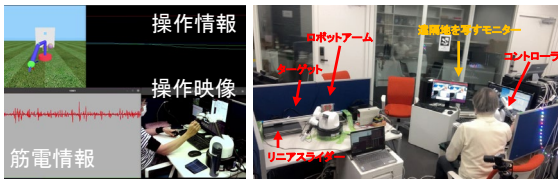
- ✓ 立ち上がりと座り込みの動作分析に基づき、姿勢計測に加え、筋活動計測が必要なことを示した
- ✓ LSTMを用いた筋電値からの筋シナジーの未来予測方法の開発を行い、有効性を確認した
- ✓ 四相に分類される立ち上がり動作に対して相毎の筋シナジー推定を行う遠隔リハビリの可能性を示した

3-a) 遠隔サービス ② 遠隔作業

- 映像とSomatic情報を統合する実験環境を作成した
- LSTMを用いた操作情報予測とPredNetを用いた映像予測の開発と実時間実装を行った
- ロボットアームの遠隔操作システムを作成し、500msの操作情報予測の有効性を確認した
- 遠隔映像監視システムを作成し、330msの映像予測の有効性を確認した

■ 作業内容

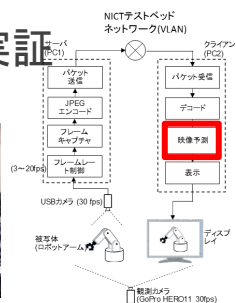
- 操作映像、操作情報、Somatic情報を統合する統合実験環境の構築
- 深層学習を用いた映像予測と操作情報予測の有効性実証
- テストベッドによる有効性実証



統合実験環境



遠隔操作実験



遠隔映像監視

■ 最終目標と達成度

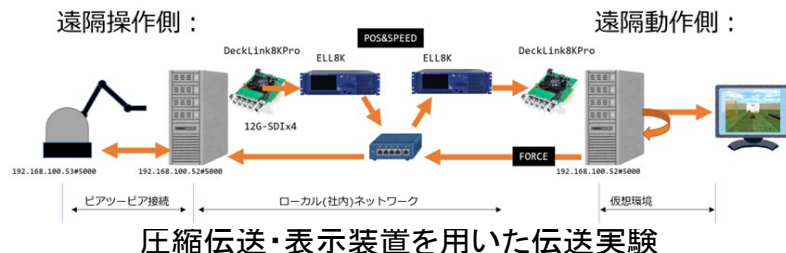
- ✓ リニアスライダーを用いた遠隔操作システムの開発と操作情報予測の有効性の確認
- ✓ 映像予測機能を有する遠隔映像監視システムの開発と映像予測の有効性の確認
- ✓ テストベッドによる有効性実証を行うと共に、複数の学会発表と特許出願を行った

3-b) 圧縮伝送・表示装置

- Somatic情報を非圧縮音声チャンネルを用いて多重化伝送するための圧縮伝送・表示装置の設計と試作を行った
- 圧縮伝送・表示装置を用いた映像とSomatic情報の多重化同期伝送実験を実施した
- NICT総合テストベッドを用いた伝送評価実験を実施した

■ 作業内容

- Somatic情報を音声信号として多重化・分離するための圧縮伝送・表示装置の設計と試作
- ローカル環境、並びにNICT総合テストベッドを活用した伝送評価実験



■ 最終目標と達成度

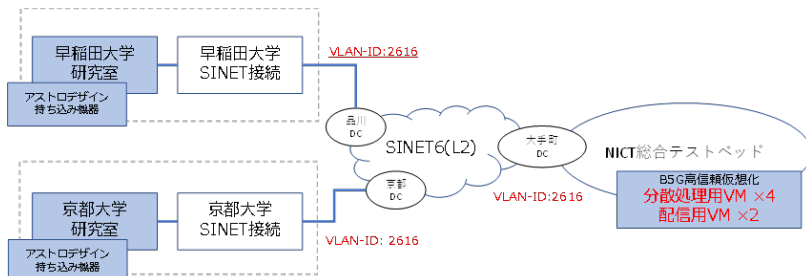
- ✓ 1kHz、32bit浮動小数点のSomatic情報をリニアPCM、8チャンネル音声に重畳するための装置設計と試作
- ✓ 圧縮伝送・表示装置を用いた8K映像とSomatic情報の多重化同期伝送実験、および約100msの遅延の確認
- ✓ NICT総合テストベッドを用いた伝送評価実験、およびIPマルチキャスト伝送実験

3-c) 統合実証試験

- 早稲田大学内に、ローカル5Gによるテストベッド環境を構築した
- 日本とタイにおける商用5G網を用いた通信実験を実施した
- NICT総合テストベッドに関する情報収集と情報交換を定期的に行い、最終年度に、早大、京大、NICT総合テストベッドをSINET経由でL2接続するテストベッドを構成し、実証実験に使用した

■ 作業内容

- 通信実験環境の整備
- NICT総合テストベッドの活用
- 三機関合同の統合実証実験の実施と、本研究開発の有効性の実証



早大・京大・NICT総合テストベッドのL2接続

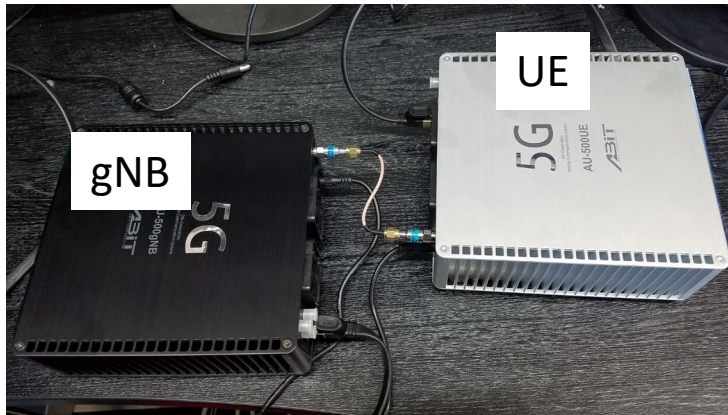
■ 最終目標と達成度

- ✓ 早大内のローカル5Gテストベッドの構築と通信実験の実施
- ✓ 日本とタイの商用5G網を用いた通信実験の実施
- ✓ NICT総合テストベッドのB5G高信頼仮想化基盤内の環境構築、早大・京大・NICT総合テストベッドをSINET経由でL2接続するテストベッドの環境構築、並びに、三機関合同の統合実証実験の実施

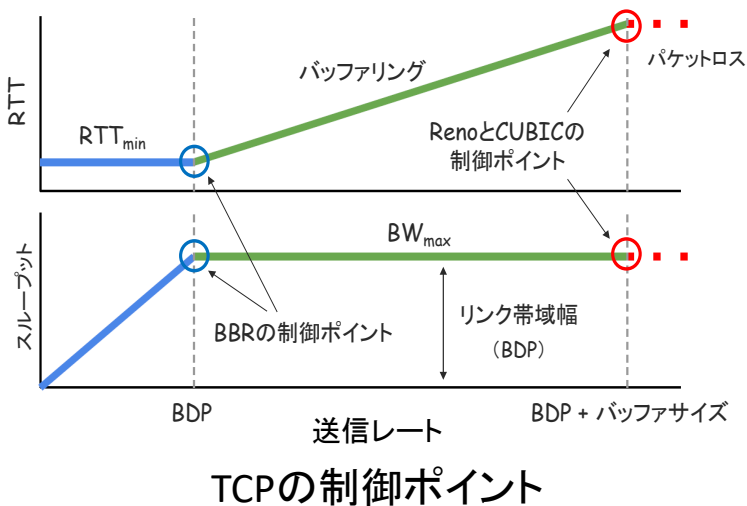
ネットワーク実験

1. ローカル5G実験

● 直結実験



● 暗箱実験



TCP: Reno, CUBIC, BBR + ping

リンク: 1G/10G LAN, WiFi 11n/11ac, L5G

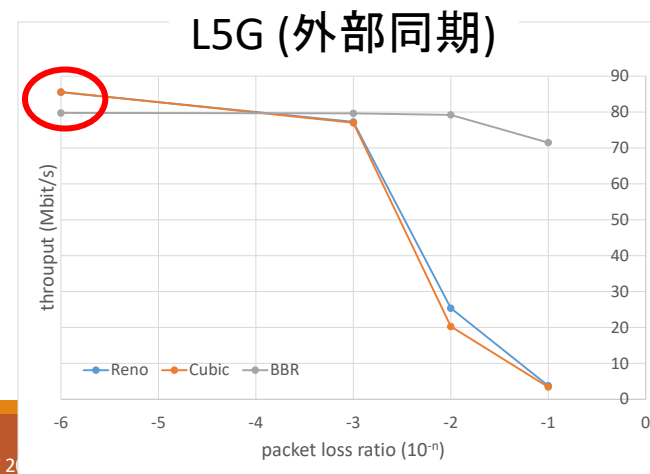
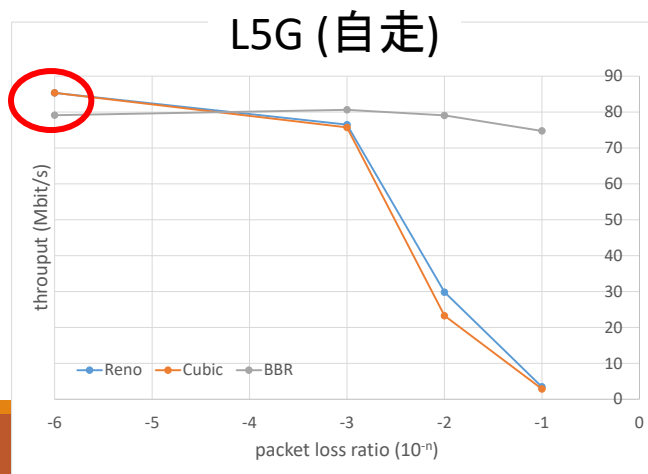
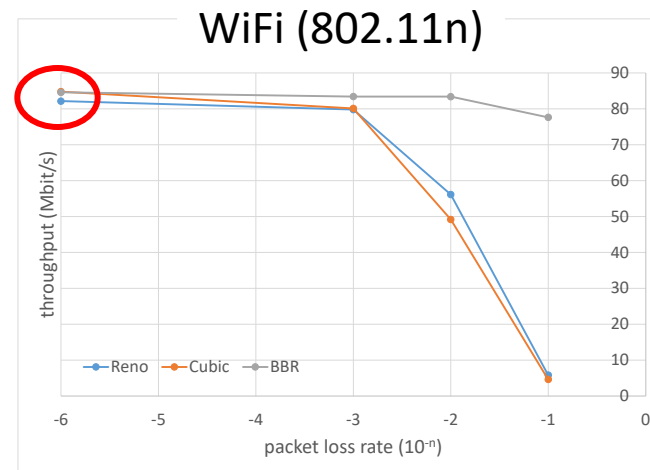
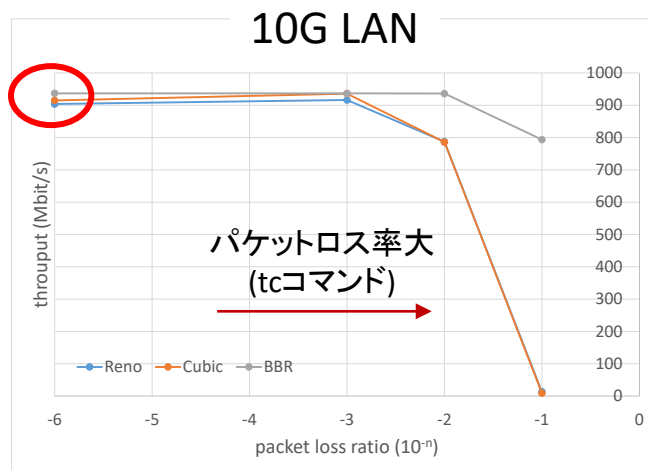
計測項目: RTT、スループット

低遅延プロトコル

	低遅延化技術	同期再生技術
仮想ネットワーク管理	低遅延スライス エッジコンピューティング キャッシュサーバ(CDN、クラウド)	
アプリケーション層	データ圧縮、適応レート制御 データ集約・多重化 プリフェッチング(オンデマンド)	タイムスタンプ バッファリング
トランスポート層	輻輳制御(RTT) ハンドシェイク回数削減	
ネットワーク層・データリンク層	優先制御(TOS、Diffserv、Priority Queueing、 IEEE 802.11e、他) 経路制御 高速ハンドオーバー 再送回数削減	
物理層	【B5G】 超高精度同期クロック(原子時計) 極小伝送間隔(TTI) 事前無線アクセス予約 フォトニックネットワーク	参照クロック

実験 (1)

● LAN, WiFi, L5G のスループット比較



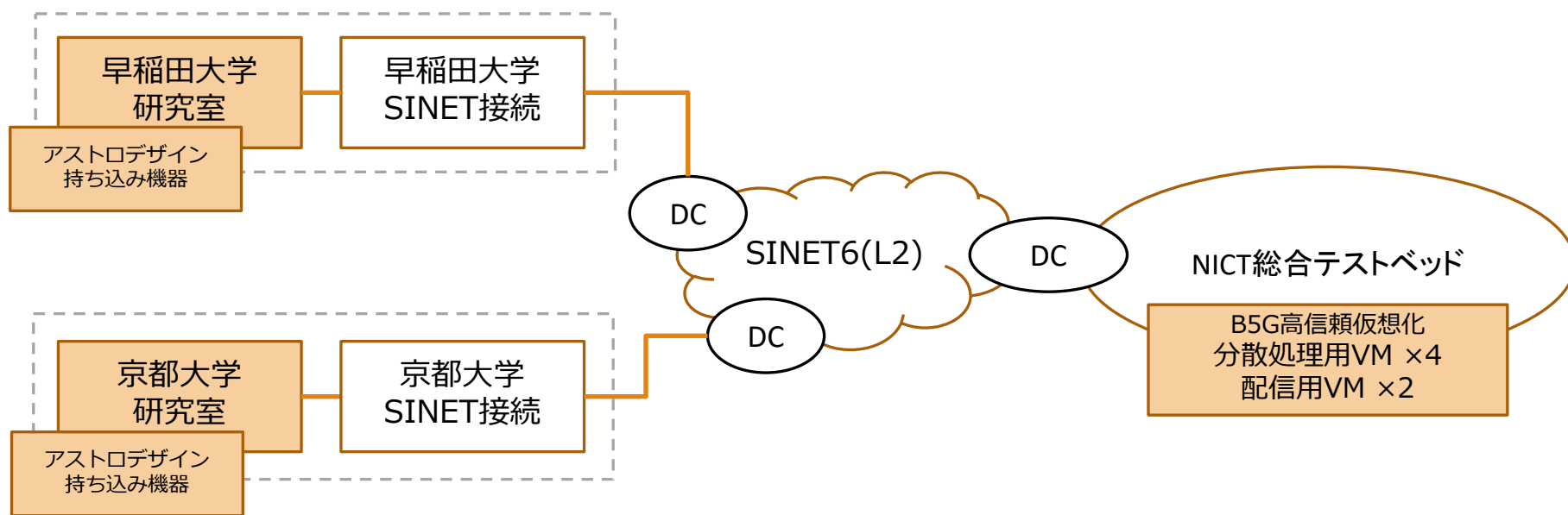
実験 (2)

● LAN, WiFi, L5G の RTT & スループット比較

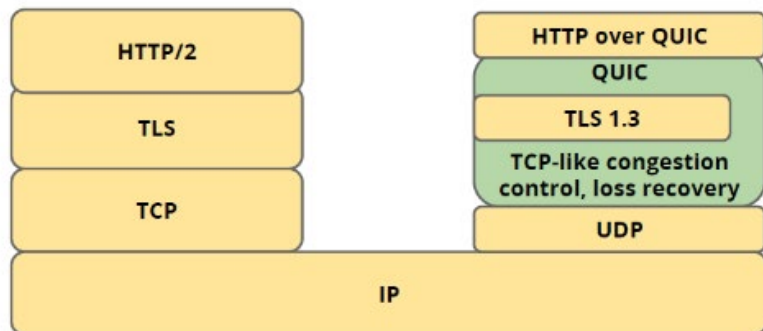
	ping (ms)			iperf/TCP (ms)			iperf/TCP (Mbit/s)		
	min	avg	max	Reno	Cubic	BBR	Reno	Cubic	BBR
1G switch	0.342	0.542	0.626	4.57726	2.14486	1.3431	903.7678621	914.9189037	936.8157338
WiFi (11n)	3.33	70.046	121.626	31.82428	40.44272	46.72772	82.15581959	84.78934003	84.59529982
L5G-gNB	5.973	8.156	10.451	98.05078	124.5988	24.56154	85.35011007	85.34020871	79.12863558
L5G-gps	5.889	8.121	10.424	98.61958	131.1177	24.8251	85.51116717	85.59167185	79.74158845

	iperf/TCP (ms)			ping (ms)		
	Reno	Cubic	BBR	min	avg	max
1G switch	4.57726	2.14486	1.3431	0.342	0.542	0.626
WiFi (11n)	31.82428	40.44273	46.72772	3.33	70.046	121.626
L5G-gNB	98.05078	124.5988	24.56154	5.973	8.156	10.451
L5G-gps	98.61958	131.1177	24.8251	5.889	8.121	10.424
10G switch	4.27636	2.1431	1.3389	0.335	0.568	0.648
WiFiacax	68.65306	30.68926	19.37934	5.972	86.314	313.496

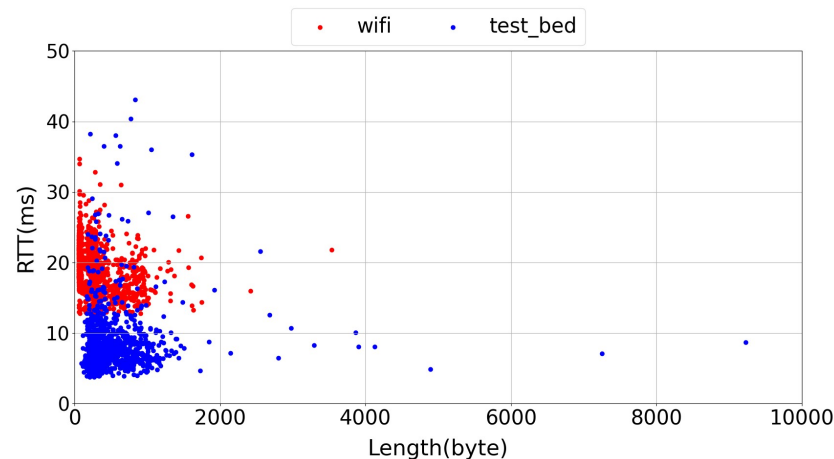
2. テストベッド実験



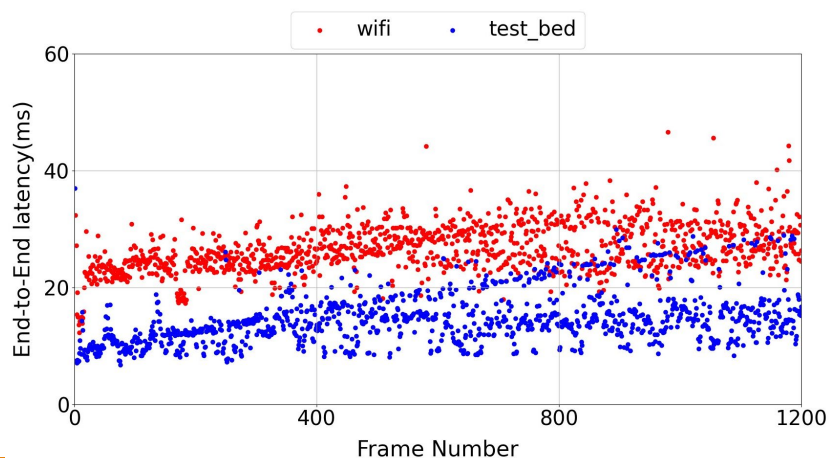
映像配信実験



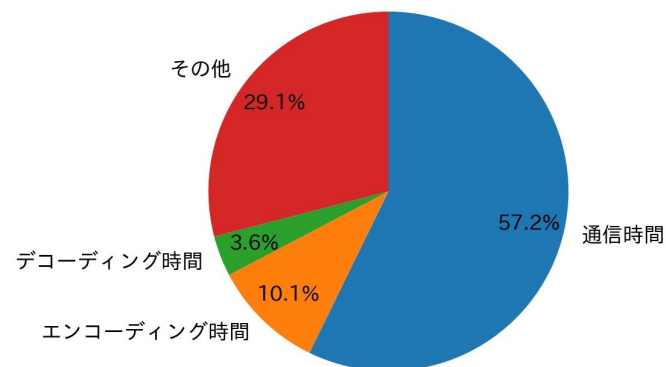
WebTransport



パケットサイズとRTTの分布

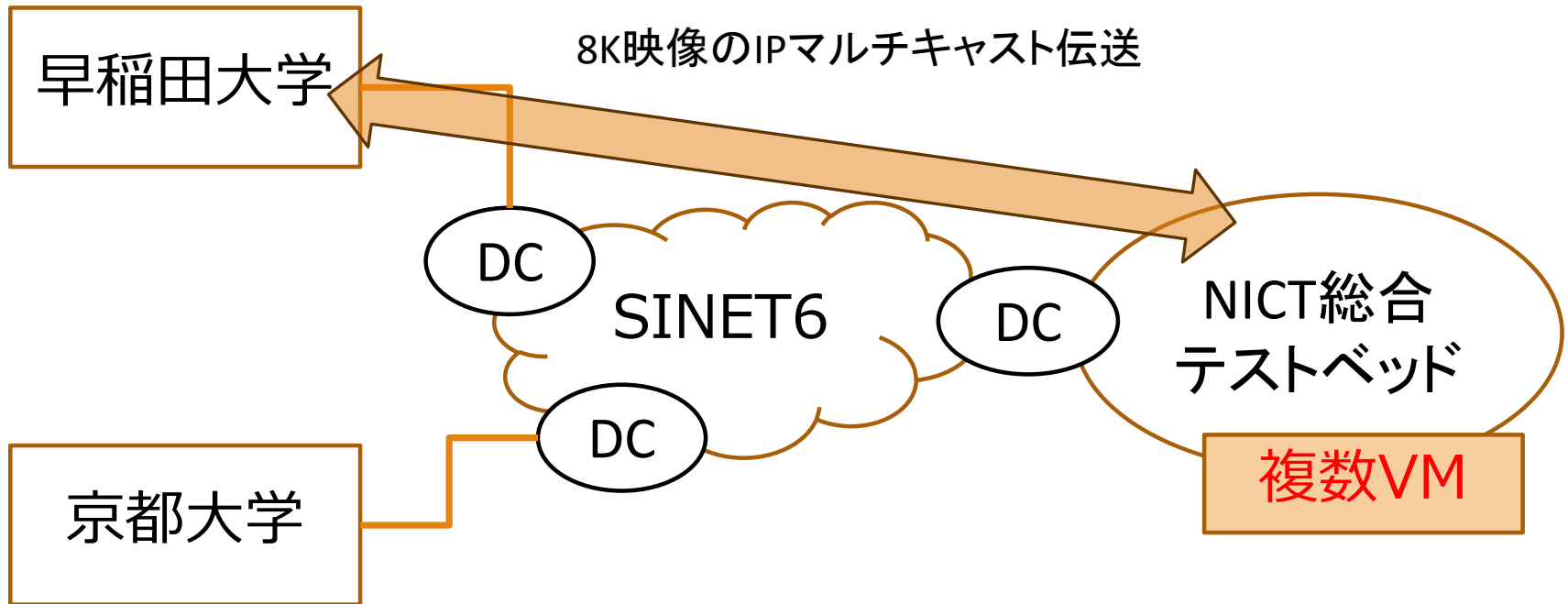


エンドエンド遅延の推移



エンドエンド遅延の内訳

IPマルチキャスト実験



おわりに

おわりに

- 深層学習による未来予測と B5G 超低遅延ネットワークの組合せ
 - ✓ 伝送遅延の未来予測による補償
 - ✓ 映像・Somatic情報のゼロレイテンシー伝送
 - ✓ 応用例
 - テレワーク、オンライン授業
 - 監視システム、オンラインゲーム、リモートセッション
 - 遠隔医療、遠隔自動運転、遠隔ロボット操作

https://www.katto.comm.waseda.ac.jp/~katto/zero_latency/