

3D 立体視映像を用いた映像通信の QoE 評価に関する検討

遊佐 元太 玉手 駿 藤井 哲郎

3D 技術は通信の分野でも注目を集めており、臨場感あふれるテレビ会議を実現するために、3D 映像によるリアルタイム通信が有効と言われている。また、遠隔地の映像を立体的に映し出すことは、ロボット等の遠隔操作では必須条件であろう。災害現場或いは原子力発電所内での作業の様子が人がアクセスできない場所において、遠隔操作ロボットを活用する機会が増えており、遠隔操作をサポートする 3D 立体視映像伝送技術の重要性はますます高まっていると考えられる。これらに対応するためには、3D 立体視映像の伝送品質に関する正確な評価が大切である。本稿では、IP ネットワークを用いて伝送された 3D 映像の圧縮率、パケットロスと映像品質の関係を主観評価実験により明らかにする。さらに、ネットワークを介したロボット操作を 3D 立体視映像にて行い、遠隔操作の作業性に関する評価結果も報告する。これらは、実用性のある 3D 立体視映像伝送を目指した基礎的な QoE 評価実験である。

キーワード：3D 立体視映像、映像伝送、QoE 評価、伝送遅延、遠隔操作

1 まえがき

近年、3D 立体視映像を利用したコンテンツは映画やゲーム機など多岐にわたり、目覚ましい発展を遂げている。日常生活の中でも 3D 映像技術に触れる場面が多くなってきており、身近なものになりつつある。この 3D 立体視映像技術は通信の分野でも大きな注目を集めており、遠隔地のオフィス間でコミュニケーションをとる際に高い臨場感でやりとりすることができると考えられている^[1,2]。3D 立体視映像技術の最大の魅力は従来の 2D 技術には無かった“奥行き表現”が可能となることであり、表示される人物や物体との距離感、位置関係などを自然な形で伝えることができると期待されている。

しかし、遠隔地との間で映像通信のやり取りをする際に、映像の圧縮率が映像品質に大きくかかわってくる。また、最近幅広く利用されている IP ネットワークを用いた通信では、パケットロスも発生する。このような環境において、実用的な 3D 立体視映像通信を実現するための基礎データ取得を目的とし、映像圧縮、パケットロス等による劣化と利用者が感じる QoE (Quality of

Experience) 品質との関係を明確にしておく必要がある。また 3D 映像を撮影・視聴するにあたり、様々な仕様のカメラ及びモニターが登場してきている。当然、カメラ及びディスプレイの仕様によっても 3D 立体視映像の見え方など見やすさに違いが生じるのではないかと考えられ、QoE 評価に影響を与えると思われる。これらに関する基礎的な評価を行う。

遠く離れた場所で活躍するロボットを遠隔操作する為には、3D 立体視映像が非常に有効であると推察できる。災害現場或いは原子力発電所内での作業の様子が人がアクセスできない場所において活用される遠隔操作ロボットも想定して、その操作に必要な 3D 映像品質の評価を行う。この場合、伝送距離に応じた遅延も作業性に大きくかかわってくることになる。本稿では、3D 立体視映像を用いた遠隔地からの操作を行う場合の作業性についても定量的な評価を試みた結果を併せて報告する。これらの検討を通し、3D 立体視映像の伝送にかかわる問題点を QoE 評価の観点から明確にすることを目的とする。

2 双方向 3D 映像通信システムの構築

本学情報基盤センター 2 階の映像メディアルームと映像編集室の 2 か所をギガビットイーサネットに接続し、3D 立体視映像を用いた TV 会議システムを構築した。CODEC (映像符号化装置) として、2 組の Teradec 社 CUBE 205 Encoder と 405 Decoder を用いる。この装置は、1080/60i フル HD 映像を映像圧縮方式 H.264/AVCHD を用いて圧縮し、IP ネットワークを介してスト

YUSA Genta

東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 2014 年度卒業生
TAMATE Syun

東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 2014 年度卒業生
FUJII Tetsuro

東京都市大学 環境情報学部 情報メディア学科 教授

リーム配信することができる。ビットレートは、128Kbps から 10Mbps まで自由に設定できる。伝送プロトコルとして UDP を用いており、低遅延にて双方向の通信が実現できる。この CODEC を標準モードで用いると片方向で 660msec の遅延が発生する。但し、低遅延モードを用いることにより 280msec まで遅延を低減できる。

3D 映像用ビデオカメラは JVC 社製 GS-TD1, SONY 社製 HDR-TD10, Panasonic 社製 HDC-Z10000 の 3 種類の 3D カメラが準備されている。機種毎の 2 個のレンズ間距離を表 1 に示す。このレンズ間の距離により、撮影された 3D 映像の見え方が異なり、適切な使い分けが求められる。表示に用いるテレビは Sony 社 KD-55X8500A 及び KDL-40EX500 であり、どちらも液晶シャッター式メガネをかけて視聴する。この他に SONY 社製ヘッドマウント型液晶ディスプレイ HMZ-T2 も用意されている。なお、3D 映像を伝送する際には、Side by Side Half 方式の 3D 映像信号をビデオカメラより出力し、これを CUBE205 に入力し、H.264/AVCHD 方式による 3D 映像の符号化・伝送を行う。

この二つの実験室を繋ぐギガビットイーサにネットワークシミュレータである日本 CAD 社製 EtherDelay Pro 或いは Netem 機能を搭載したパソコンを挿入することにより、様々な IP ネットワーク環境をエミュレートできる。伝送遅延を 1msec から 1 秒の間で設定可能であり、パケットロスも 0% から 100% の間で任意に発生させることができる。これにより、東京・大阪間のインターネットを用いたテレビ会議をエミュレートでき、様々な評価実験を行うことが可能となっている。既に、双方向 3D 映像通信における主観評価実験結果などが報告されている [3]。

3 3D 立体視映像の QoE 評価

3.1 主観評価実験の手順

3D 立体視映像の通信品質を評価する為に、主観評価実験を行う。図 1 に示された双方向 3D 映像通信システムの片方向のパス（映像メディアルームから映像編集室の方向）を用い、テレビ会議における 3D 映像を録画し、この録画した映像を用いて主観評価実験を行う。受信側の映像のキャプチャーには Convergent Design 社製 nanoFlash を用いて、Side by Side Half 方式の映像をフル HD 映像で録画した。録画する際に、映像伝送のビットレート及びパケットロスを様々に変化させる。これにより、複数の評価者が同じ 3D 映像を観ながらビットレート及びパケットロスに関する主観評価実験を行うことが可能となる。

主観評価実験に際し、人物 1 人、人物 2 人、人物 3 人、

表 1 3D カメラ毎のレンズ間距離

機種	HDR-TD10	GS-TD1	HDC-Z10000
レンズ間	31mm	35mm	41mm

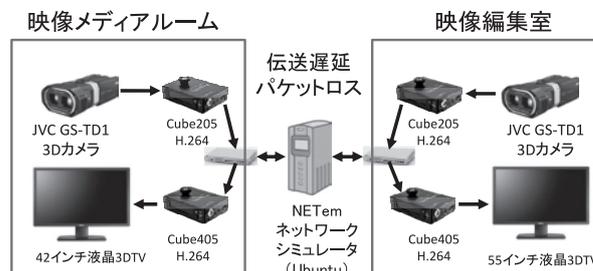


図 1 双方向 3D 映像通信システムの構成

人物 5 人一列、人物 5 人二列を撮影した 5 種類の 3D 映像を作成した。いずれの映像も、手を挙げたり大きく左右に振ったり、動きのある 3D 映像となるように制作している。5 人の映像に関しては列数の差による 3D 映像の見え方を探るべく、一列と二列 2 種類の映像を用意した。映像ビットレートに関しては 1Mbps から 10Mbps の間で検証を行う。これは前述のエンコーダ Cube205 で変化させることができる範囲であり、立体感を伴った伝送が可能な範囲である。

映像の編集には Sony 社製 VegasPro12 を用いる。これはステレオスコピック 3D モードに対応しており、左右の映像をレンダリング無しで表示できる。3D 映像は、Side by Side Half 方式で出力する。3D 立体視映像がランダムに 10 秒ずつ流れるように編集し、評価映像の間には映像番号を表示するブラックバック画面を 5 秒間ずつ導入し、全体で約 20 分間の主観評価映像を作成した。

3D 映像再生装置としてバッファロー Link Theater LT-V200 を用いる。ディスプレイは SONY 社製 55 インチ液晶テレビ KD-55X8500A と SONY 社製ヘッドマウントディスプレイ HMZ-T2 を用いた。55 インチ液晶テレビの場合には、映像をより正確に評価してもらうために最適視聴距離 3H となるように、ディスプレイから 204cm 離れて評価実験を行った。被験者 10 人に対し、主観評価実験を行った。評価方法に関しては立体映像の品質に関して 1 (非常に悪い), 2 (悪い), 3 (普通), 4 (良い), 5 (非常に良い) の 5 段階評価を行う。

3.2 ビットレートに関する QoE 評価

3D カメラとして、JVC 社製 GS-TD1 及び Panasonic 社製 HDC-Z10000 で撮影した 3D 映像を用いて、55 インチ液晶テレビ KD-55X8500A で主観評価実験を行った結果を図 2 及び 3 に示す。同図より明らかなように、

3D カメラの違いによる評価結果の差は殆ど無い。また、5 人二列の映像の主観評価値が最も高くなっている。これに対して 1 人或いは 5 人一列は立体感に乏しい為、主観評価値が低くなっている。両図において、ビットレートがほぼ 5Mbps を超えるとほぼ MOS 値も 3 を超える。3D 立体視映像を H.264 方式を用いてテレビ会議を行う場合、最低でも 5Mbps は必要と判断される。

次に、ディスプレイをヘッドマウントディスプレイに変更して主観評価実験を行った結果を図 4 に示す。同図において、用いた 3D カメラは Panasonic 製 HDC-Z10000 である。図 3 と比較することにより、ビットレートに関する主観評価実験において 55 インチの液晶デ

ィスプレイとヘッドマウントディスプレイの差は殆どないと判断できる。

3D 立体視映像と通常の 2D 映像の比較を行う為に、同様にビットレートを変化させて、55 インチ液晶テレビを用いて主観評価実験を行った結果を図 5 に示す。評価に用いたシーンは、最も立体感が高い 5 人 2 列のシーンをを用いた。3D カメラに関しては Panasonic HDC-Z10000 で撮影した映像を使用した。全体的に若干ではあるが 3D 映像の評価が 2D 映像を下回っている。これは約 20 分間の間 3D メガネをかけ、ビットレート 1Mbps という劣悪な 3D 映像を視聴し続けることから生まれる眼疲労が原因の一つではないかと考えられる。

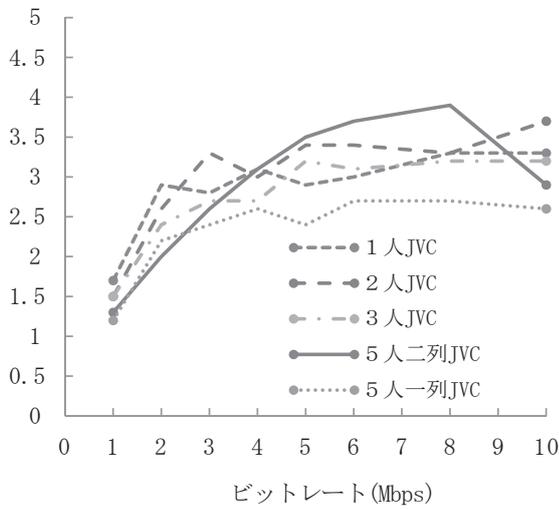


図 2 3D カメラ GS-TD1 (JVC) 及び 55 インチ液晶テレビを用いた主観評価結果。ビットレートは 1Mbps から 10Mbps。

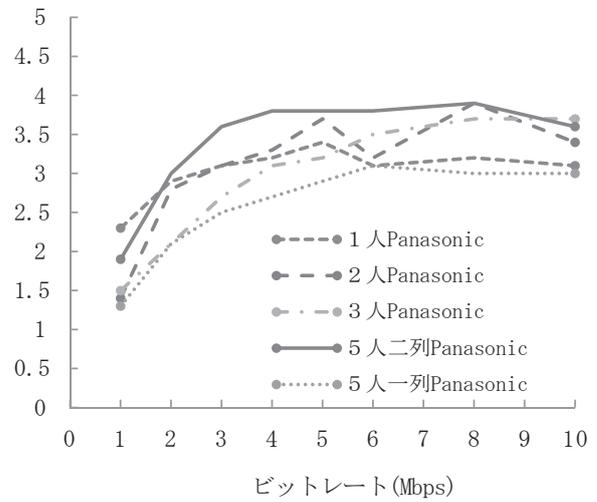


図 4 3D カメラ HDC-Z10000 (Panasonic) における主観評価結果。ヘッドマウントディスプレイを用いて評価。

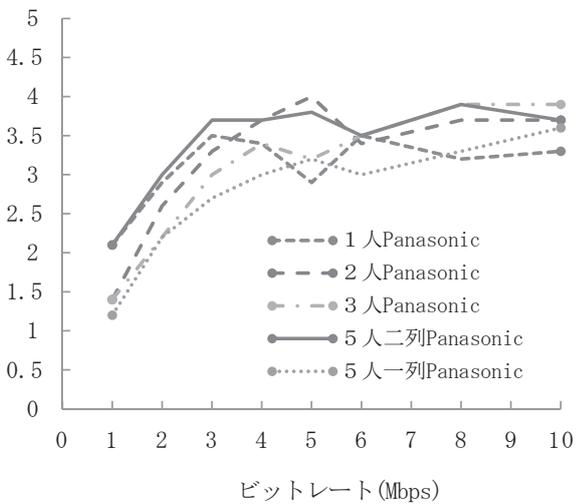


図 3 3D カメラ HDC-Z10000 (Panasonic) 及び 55 インチ液晶テレビを用いた主観評価結果。ビットレートは 1Mbps から 10Mbps。

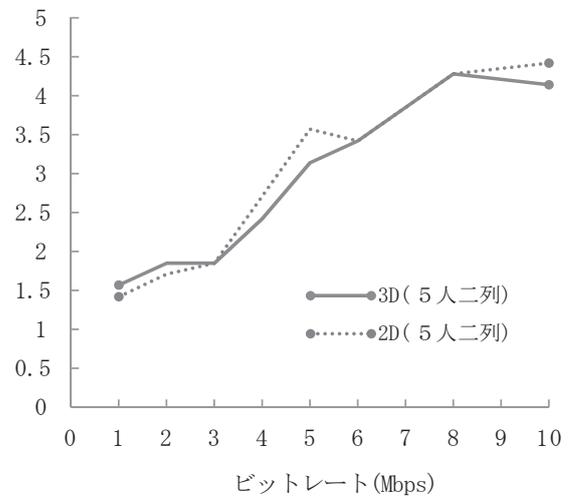


図 5 3D カメラ GS-TD1 (JVC) 及び 55 インチ液晶テレビを用いた主観評価結果。ビットレートは 1Mbps から 10Mbps

実際、被験者の多くから実験後目の疲労を訴えられた。さらにこの傾向はビクターや他の種類の映像においても見られた。なお、2D 映像においても 5Mbps 以上から快適な評価が得られることがわかった

以上の結果より、3D 立体視映像を用いたテレビ会議において、実用的な品質を確保するためには 5Mbps 以上の伝送レートが必要なことが示された。被写体の人数、配置によって見易さが異なることも明らかとなった。また、カメラ及びディスプレイによる差が殆ど無いことも示された。

3. 3 パケットロスに関する QoE 評価

前章で構築した 3D 映像通信システムのエンコーダとデコーダの間に設置された回線遅延シミュレータにおいてパケットロスを発生させ、パケットロスにより劣化した 3D 映像に対する主観評価実験を行う。本実験では、回線遅延シミュレータとして日本 CAD 社製 Ethdelay Pro を用いる。これにより任意のパケットロス率を設定できる。

パケットロス率は、0%から 0.3%の間で変化させた。0.3%を超えると、映像が激しく乱れ、映像がハングアップした状態になることを確認した。映像のキャプチャーには前回同様に nanoFlash を用いた。映像の伝送ビットレートは、最高品質となる 10Mbps とした。主観評価実験は、前節と同様の 5 段階評価で行う。3D カメラとして Panasonic 社製 HDC-Z10000 を用い、映像ビットレート 10Mbps においてパケットロスを変化させた時の 55 インチ液晶ディスプレイによる主観評価結果を図 6 に示す。ディスプレイをヘッドマウントディスプレイとしたときの主観評価実験の結果を図 7 に示す。

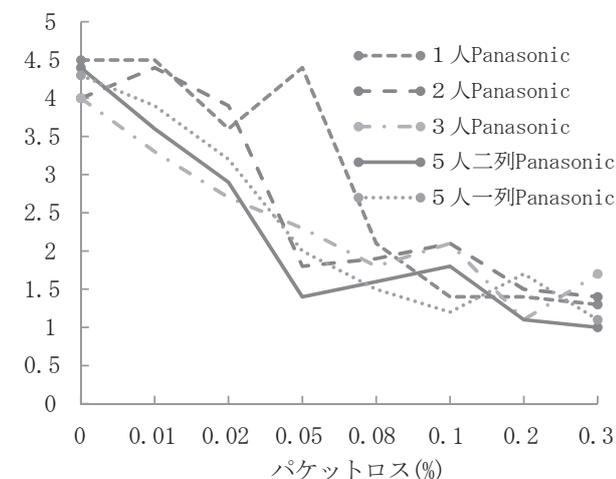


図 6 3D カメラ GS-TD1 (JVC) 及び 55 インチ液晶テレビを用いたパケットロスに関する主観評価結果。

同図から明らかなように、ディスプレイの種類の変化による差は、殆ど見られなかった。また、両図より明らかなように、パケットロス率が 0.02% 以下において高い MOS 値を示している。即ち快適な 3D 立体視映像通信を行うためには、パケットロスが 0.02% 以下である必要がある。

さらに、ビットレート 10Mbps におけるパケットロス率に関する 3D 映像と 2D 映像との差を主観評価実験した結果を図 8 に示す。5 種類の映像の中から、最も典型的な 5 人二列の映像の場合を示しておく。ロス率 0.05% をはじめ、5 人二列の映像では全体的に 3D 立体視映像の評価が 2D 映像を下回っている。これは、3D 立体視映像の方がパケットロスによる映像品質のダメ

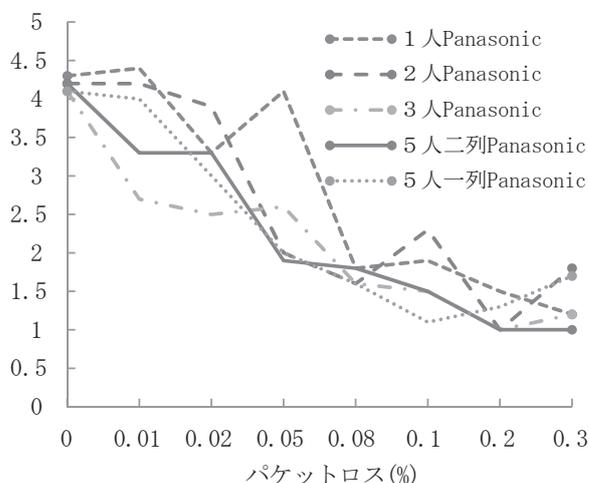


図 7 3D カメラ HDC-Z10000 (Panasonic) 及びヘッドマウント・ディスプレイを用いたパケットロスに関する主観評価結果。

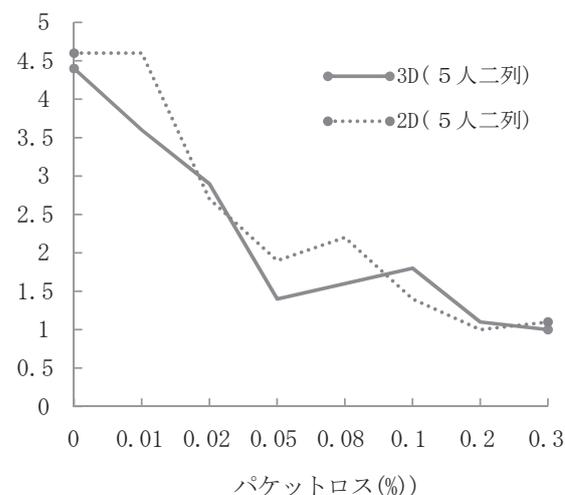


図 8 3D カメラ HDC-Z10000 (Panasonic) 及び 55 インチ液晶テレビを用いたパケットロスに関する主観評価結果。

ージが大きい為と推察される。3D 立体視映像は、右目画像のみがパケットロスにより劣化した場合でも、左目も含めたトータルで立体映像が人間の頭の中で再構築できなくなるために、ダメージが多めに加わる為と推察される。

4 遠隔作業における QoE 評価

4.1 ロボットアーム遠隔操作システムの構築

3D 立体視映像を用いた遠隔操作の作業性評価を行う為に、ネットワークを介してロボットアームを遠隔操作するシステムを構築する。このシステムを用いて、被験者にタスクを課しその作業時間を計測することにより、3D 立体視映像を用いた遠隔操作の作業性評価を行う。遠隔操作するロボットアームにはイーケイジャパン社製の MR-999 を用いる。これは、5つの関節を持つロボットアームであり、比較的簡単に入手できる。この装置を図 1 に示された双方向 3D 映像通信システムの方端である情報メディアルームのスタジオ内に設置した。映像編集室のパソコンから操作する為に、同社製の MOVIT-LAB2 IF-100 (制御インターフェイスボード) と付属の制御ソフトを用いる。この制御ソフトの操作画面を Windows パソコンのリモートデスクトップ機能を用いて遠隔地のパソコンの画面に表示し、遠隔地からロボットアームを操作する。即ち、情報メディアルーム内にロボットアームとインタフェースを介して接続されたパソコンを設置し、その画面をリモートデスクトップ機能により映像編集室のノートパソコンに表示し、映像編集室からロボットアームの遠隔操作を行う。

ロボットアームの様子を撮影する 3D 映像カメラとして SONY 社製の HDR-TD10 を用いた。映像伝送には、図 1 の映像伝送システムをそのまま用いる。実験において、最も高品質な映像伝送が可能となるようにビットレートを 10Mbps に設定し、Side by Side Half 方式で 3D 映像の伝送を行った。映像は映像編集室に伝送し、55 インチの 3D 液晶ディスプレイである SONY 社製 KD-55X8500A に表示する。液晶シャッター付の 3D メガネを装着して 3D 映像を観ることになる。この映像を

見ながら、ロボットアームを遠隔操作する。構築したロボットアームの遠隔操作システムの外観を写真 1 と 2 に示す。

様々なネットワーク環境下における 3D 立体視映像を用いた遠隔操作の操作性を評価する為に、ネットワークにおいて伝送遅延が発生した場合と、IP 伝送におけるパケットロスが発生した場合を計測する。この実験では、ネットワークシミュレータ機能 (Netem) を組み込んだパソコン (OS: Ubuntu) を用いた。この Netem により双方向に 0ms から 250ms までの遅延を発生させ、評価を行った。また、パケットロスを 0% から 0.3% まで発生させ、そのときの操作性の評価を行った。比較の為に、同じネットワーク環境下における 2D 映像を用いた操作性の評価実験も行う。なお、映像を伝送する際には、CODEC においても遅延が発生する。低遅延モードで用いたので、映像伝送装置では 280ms の遅延が発生している。

4.2 遠隔操作の作業性評価

被験者 10 人に対し、遠隔操作の作業性に関する評価実験を行う。タスクとして、テーブルの上に置いてある 2 個のブロックをロボットアームの遠隔操作により箱の中に入れる作業を課す。この作業に要する時間を

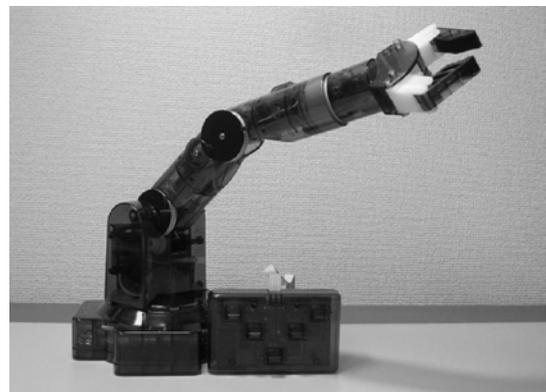


写真 1 ロボットアーム (イーケイジャパン社製 MR-999)

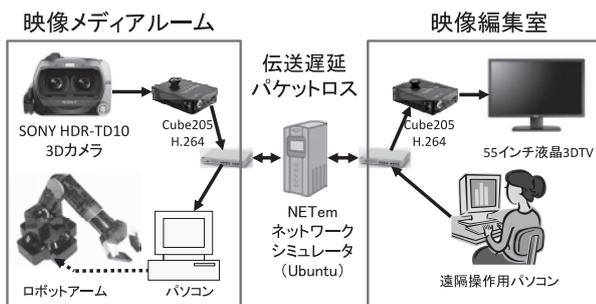


図 9 ロボットアーム遠隔操作システム



写真 2 3D 立体視映像を用いた遠隔操作端末

計測し、操作性の評価を行う。実験を繰り返すことで、ロボットアーム操作に熟練し、操作性とは別に作業時間が短くなることが予想される^[4,5]。そこで、30分程度の習熟練習を行い、その後2回のテストを行う。2回のテスト作業の時間差が5秒以内になれば評価実験を開始する。

伝送遅延時間を 0ms, 5ms, 10ms, 30ms, 50ms, 100ms, 150ms, 200ms, 250ms と変化させ、2D 及び 3D 立体視映像を用いた遠隔操作の作業性に関する評価実験を行った結果を図 10 に示す。同図より、伝送遅延時間が 100msec 以下では、3D 立体視映像を用いた作業の方が 2D 映像を用いた場合より作業時間が短く、操作性に優れていることが明かである。逆に、100msec を超えると 2D と 3D 立体視映像の差による作業時間の差が無くなる。これは、作業の困難性が大幅な伝送遅延に支配されてしまう為と推察される。特に、伝送遅延時間が 250msec を超えると、どちらの映像を用いても突然作業時間が長くなる。なお、伝送遅延が 100msec の場合、カメラで撮影した画像が遠隔地の画面に表示されるまでには、映像の符号化遅延を含めると 380msec となる。

次に、IP 伝送におけるパケットロスを 0.02%, 0.05%, 0.1%, 0.15%, 0.2%, 0.3% と変化させ、2D 或いは 3D 立体視映像を用いた遠隔操作の作業性に関する評価実験を行った結果を図 11 に示す。遅延時間は 0msec である。同図より、パケットロスが発生する状況下でも、3D 立体視映像を用いた操作環境の方が作業時間が短く、作業性が高いことが明かである。パケットロスが操作性に与える影響については 2D 映像と 3D 映像でほとんど差が無く、パケットロス率が増えるに従い、作業時間が長くなっている。なお、パケットロス率が 0.3% を超えると殆ど作業が不可能な状況となった。

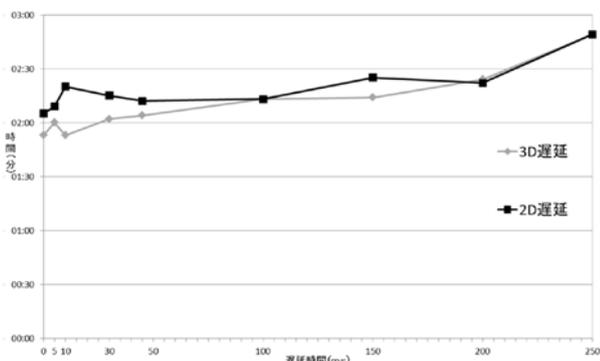


図 10 ネットワークの伝送遅延が発生した場合の 3D 立体視映像を用いた遠隔操作の操作性評価

ロボットの遠隔操作において、伝送遅延・パケットロスが存在する環境でも、3D 立体視映像を用いることにより操作時間が短くなり、効率よく遠隔操作の作業が行えることが示された。伝送遅延は 100msec 以下に抑えることが望まれることも明らかとなった。また、パケットロスが 0.3% 以上発生すると操作不能に陥ること等も確認できた。

5 まとめ

3D 立体視映像を用いた遠隔地との通信において、映像の圧縮率及びパケットロス等が大きく通信品質に関わることが示された。特に、利用者が感じる QoE 品質との関係が重要であり、大きく作業性などにかかわることが明かとなった。3D 立体視映像を用いた H.264 方式のテレビ会議においては、実用的な品質を確保するためには 5Mbps 以上の伝送レートが必要なことが示された。被写体の人数、配置によって見易さが異なることも明らかとなった。また、パケットロスは、ロス率 0.02% 以下であることが望ましいことも示された。ロボットの遠隔操作において、伝送遅延・パケットロス共に 3D 立体視映像を用いた方が操作時間が短く、効率よく遠隔操作の作業が行えることが定量的に明かとなった。伝送遅延は 100msec 以下に抑えた方が作業性が高い事が確認できた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25420388 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 山崎, 西, 野中「3D 遠隔オフィス間における実用的な 3D 映像通信へ向けた主観評価実験」電

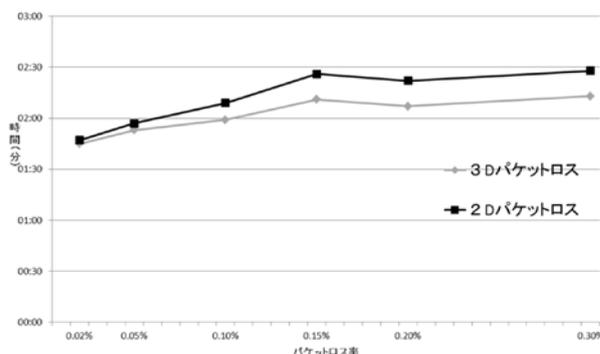


図 11 IP パケット伝送において、パケットロスが発生した場合の遠隔操作の操作性評価

- 子情報通信学会, CQ 研究会, CQ2012-36, 2012 年
- [2] 山崎, 西「パケットロス環境における 3D 映像通信に向けた主観評価実験」電子情報通信学会, CQ 研究会, CQ2013-23, 2013 年
- [3] 池田, 藤井「3D 立体視映像を用いた双方向通信における QoE の一検討」電子情報通信学会, 2015 年総合大会, A-16-5, 2015 年 3 月
- [4] 古屋, 栗生, 清水「3D 画像と体感型操縦を用いた「次世代無人化施工システム」」大林組技術研究所報, No.76, No.16, 2012 年
- [5] 古屋, 清水「簡易 VR を用いた「次世代無人化施工システム」の開発」建設の施工企画, pp.53-59, 2012 年 11 月