

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月21日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560368

研究課題名（和文）視覚・聴覚・触覚・嗅覚メディアを用いた高臨場感通信に関する研究

研究課題名（英文）Study on High-Realistic Communications with Visual, Auditory, Haptic, and Olfactory Media

研究代表者

石橋 豊 (ISHIBASHI YUTAKA)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：40252308

研究成果の概要（和文）：本研究では、視覚、聴覚、触（力）覚、嗅覚メディアを用いたいくつかのアプリケーションを対象として、高い臨場感を実現するために、サービス品質（QoS: Quality of service）制御について検討した。また、臨場感をユーザ体感品質（QoE: Quality of Experience）評価するための手法の検討も行った。QoE 評価では、ネットワーク遅延やパケット欠落が人の知覚特性に及ぼす影響を調査し、いくつかのアプリケーションにおいて客観評価尺度から高精度に主観評価尺度を推定できることを示した。さらに、QoS 制御として、反力の適応制御、メディア同期制御、ローカルラグ制御、香りの動的出力タイミング制御などを検討し、それらの有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：We studied QoS (Quality of Service) control to achieve high-realistic sensations for several networked applications with visual, auditory, haptic, and olfactory media. We also studied QoE (Quality of Experience) assessment methods to assess realistic sensations. In QoE assessment, we investigated the influences of network delay and packet loss on human perception, and demonstrated that we can estimate subjective assessment measures from objective assessment measures with high accuracy for several applications. Furthermore, we handled adaptive reaction force control, media synchronization control, local lag control, and dynamic output timing control of fragrance as QoS control and illustrated the effectiveness of the control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：マルチメディア・サービス品質制御

1. 研究開始当初の背景

従来の視覚・聴覚メディアに加えて、触（力）覚・嗅覚メディアのネットワーク利用

が可能となりつつある。これは、触覚インタフェース装置や嗅覚ディスプレイが市販されるようになったことによる。また、視覚メ

ディアについても自由視点の立体ビデオが研究されてきている。これらのメディアを同時に用いることにより、高い臨場感が達成されると期待できる。

音声と通常のビデオの通信については、これまでに極めて多くの研究が行われている。しかし、多数のカメラで撮影した多視点ビデオから構成される自由視点の(立体)ビデオ、触覚メディア、嗅覚メディアの通信を扱う研究は多くない。これらのメディアを扱う研究の多くは、十分に広帯域なネットワークを仮定するか、ネットワークをブラックボックス化し、ネットワーク遅延揺らぎとパケット欠落の影響を考慮していない。

これに対して、研究代表者らは、触覚メディアを主な研究対象に、ネットワーク遅延揺らぎとパケット欠落を考慮してきている。特に、触覚メディアと通常のビデオの二感通信、触覚メディア、サウンド、及び通常のビデオの三感通信を扱ってきている。一方、連携研究者は、これまで自由視点の(立体)ビデオの研究を行ってきた。特に、100台のマルチカメラシステムを構築し、それによって撮影された多視点ビデオの補正や自由視点ビデオ生成を行い、圧縮・伝送し表示している。本研究は、研究代表者と連携研究者のこれまでの研究成果を組み合わせると共に、嗅覚メディアを付け加えて、さらに発展させようとするものである。

2. 研究の目的

本研究では、高臨場感通信の実現を目指し、IPネットワークにおける視覚、聴覚、触(力)覚、嗅覚メディアのサービス品質(QoS: Quality of Service)制御について研究する。視覚メディアには、自由視点ビデオの他、通常のビデオやCG(Computer Graphics)を扱い、立体視も行う。QoS制御として、メディアの時間構造を回復・保持するメディア同期制御、ネットワーク遅延揺らぎやパケット欠落率を小さく抑えるトラフィック制御、パケット欠落から回復する誤り制御などを検討する。高効率なQoS制御のため、ネットワーク遅延やパケット欠落がユーザ体感品質(QoE: Quality of Experience)に及ぼす影響を調査する。また、臨場感の評価手法についても検討する。

3. 研究の方法

本研究では、視覚、聴覚、触覚、嗅覚メディアの四つを常に同時に扱うのではなく、QoS制御やQoE評価の検討が容易なように、以下に示すように、立体ビデオと自由視点ビデオについては個別にも扱うと共に、二つから四つのメディアの組み合わせを研究対象とした。

(1)立体ビデオ伝送

まず、立体ビデオの左右のフレーム間の遅延が立体視に及ぼす影響を調査した。また、ネットワーク遅延揺らぎとパケット欠落の影響も調べた。次に、立体ビデオの誤り補償を検討し、パケット欠落がQoEに及ぼす影響を調査した。さらに、ビデオを構成するスライス数の影響も調べた。

(2)自由視点(立体)ビデオ伝送

自由視点ビデオ伝送方式として、多視点伝送方式、合成画像伝送方式、画像・奥行き画像伝送方式の三つを対象に、ネットワーク遅延が視点変更に及ぼす影響をQoE評価によって調査した。また、自由視点ビデオの立体視を実現し、同様の評価を行い、立体視しない場合との比較を行った。

(3)ビデオ・音声伝送

ビデオ・音声をを用いた遠隔合唱を対象とし、ネットワーク遅延の差が合唱の同期品質に及ぼす影響をQoE評価によって調べた。また、QoS制御として、視聴者の端末で端末間同期制御によって複数の歌い手のビデオ・音声をメディア間同期させる方法を検討した。

(4)(立体)ビデオ・力覚メディア伝送

立体ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムにおいて、文字を書く作業を扱い、ネットワーク遅延とその揺らぎがQoEに及ぼす影響を調査した。そして、ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムにおけるQoS制御として、ネットワーク遅延に応じて反力の大きさを動的に変更する反力の適応制御を適用する検討を行った。

(5)自由視点ビデオ・力覚メディア伝送

自由視点ビデオ伝送システムと力覚メディアを用いた遠隔制御システムを組み合わせ、自由視点ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムを構築した。そして、視点を自由に変更する場合と、変更しない場合で作業を行い、自由に視点を変更することによって得られる効果を調査した。また、自由視点ビデオと力覚メディア間の同期を端末間同期制御によって行うアルゴリズムについて検討し、動作確認を行った。

(6)ビデオ・サウンド・力覚メディア伝送

ビデオ、サウンド、力覚メディア間の同期誤差がQoEに及ぼす影響を調査した。また、ネットワーク遅延やその揺らぎの影響も調べた。さらに、タンバリンと鍵盤ハーモニカを用いた遠隔合奏も扱い、ネットワーク遅延がQoEに及ぼす影響を調査した。

(7)CG・サウンド・力覚メディア伝送

視覚メディアとして三次元CGで構成され

た三次元仮想空間内のドラムセットを二人の利用者が一緒に叩くシステム（遠隔ドラム演奏システム）を対象とし、ネットワーク遅延がQoEに及ぼす影響を調査した。また、合同演奏の高品質な同期を実現するため、ローカルラグ制御について検討した。

(8)CG・嗅覚・力覚メディア伝送

CG・嗅覚・触覚メディアを用いた果物狩りを対象に、果実をもぐと香りがするようにし、もぐときの感触と香りとの同期誤差がQoEに及ぼす影響を調査した。また、その果物狩りを拡張して、果物狩り競争ゲームを行えるようにし、果物を視点に近づけると香りがするような方法を検討した。また、香りが利用者に届くまでの時間が利用者間の公平性に及ぼす影響を調査した。さらに、遠隔生け花を対象に同様の検討を行った。

(9) CG・嗅覚・サウンド・力覚メディア伝送

上記の果物狩り競争ゲームにサウンドによる効果音を追加し、触覚とサウンドの有無を切り替えることによって、臨場感のQoE評価を行い、各感覚が臨場感に及ぼす効果を調査した。また、遠隔生け花においても、触覚と嗅覚の有無を切り替えることによって、同様の評価を行った。

4. 研究成果

(1)立体ビデオ伝送

立体ビデオ伝送を行う際に発生する左右のビデオ間のフレーム遅延が、立体視に及ぼす影響について評価した結果、立体視可能なフレーム遅延の範囲は、2以下であることが分かった。また、ネットワーク遅延揺らぎやパケット欠落がビデオの立体視に及ぼす影響も調査した。その結果、注目している物体のy軸方向の運動速度が速い場合にネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落による立体視への影響を受けやすいことなどが明らかになった。

さらに、立体ビデオ伝送において、あるスライスが欠落した場合に、その前に出力されたスライスを用いて欠落スライスを補う誤り補償方式を扱い、一つでも欠落したスライスがあった場合、左右の両フレームを廃棄する両方廃棄方式、欠落のあったフレームだけを廃棄する片方廃棄方式との比較を行った。その結果、誤り補償方式は、画像品質に劣化があり、立体視できた人の割合が僅かに減少する場面があることが分かった。また、両方廃棄方式は物体の動きの滑らかさが大きく劣化し、片方廃棄方式は物体の動きの滑らかさと画像品質が劣化することが分かった。そして、総合品質については、誤り補償方式は他の方式に比べ、高いQoEを達成できることが明らかとなった。この他、誤り補償方式に

対して、ビデオを構成するスライス数お影響を調べるため、スライス数が8、16、32の場合の評価を行ったところ、スライス数は16で十分であることが判明した。

(2)自由視点（立体）ビデオ伝送

伝送元のサーバで自由視点ビデオを合成し、そのビデオのみを伝送する合成画像伝送方式と、画像とその奥行き画像を伝送し、クライアントで合成する画像・奥行き画像伝送方式を比較対象とし、多視点伝送方式を基準として、画像品質、視点変更のインタラクティブ性、総合品質のQoE評価を行った。その結果、合成画像伝送方式は画像品質に優れ、画像・奥行き画像伝送方式はインタラクティブ性に優れることが明らかとなった。また、総合品質は、ビデオコンテンツの特性やカメラワークにより方式間の優劣が異なるため、目的（ユニキャスト、マルチキャスト等）や状況（画像品質とインタラクティブ性のどちらを重視するのか）に応じて二つの方式を使い分ける必要があることが分かった。

さらに、自由視点ビデオを立体視する場合に同様な評価を行った結果、二つの伝送方式間の大小関係はほぼ同じであったが、両方式とも立体視を行わない場合よりも行う場合の方が高いQoEをとる傾向にあることが判明した。

(3)ビデオ・音声伝送

多地点間において音声とビデオを用いて合唱を行う場合を扱い、視聴者のいる地点で多地点からの歌声を同期させるために、端末間同期制御を適用することを考え、QoE評価によって、ネットワーク遅延が視聴者の感じるメディア同期品質に及ぼす影響や端末間同期制御の効果を調査した。その結果、端末間同期制御を行うことによって、その制御を行わない場合に比べて、合唱のメディア同期品質を高く維持できることを示した。

(4)（立体）ビデオ・力覚メディア伝送

立体ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムにおいて、ネットワーク遅延が立体ビデオの出力品質、触覚インタフェース装置の操作性、インタラクティブ性、及び総合品質に及ぼす影響をQoE評価した。また、アプリケーションレベルQoSの評価も行い、重回帰分析によって、アプリケーションレベルQoSパラメータからQoEパラメータを高精度に推定できることが分かった。

また、ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムにおけるQoS制御として、往復ネットワーク遅延に応じて、反力の計算に用いられる弾性係数を動的に変更する反力の適応制御を適用し、QoE評価によって、その制御の有効性を示した。

(5)自由視点ビデオ・力覚メディア伝送

三次元センサとして Kinect を採用し、自由視点ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システムを構築した(図1参照)。そして、一人の利用者が遠隔の触覚インタフェース装置 (PHANTOM Omni) を操作して、指定された高さの位置まで PHANTOM スタイラスの先端を移動する作業を行い、視点を自由に変更する場合と、固定する場合とで、平均作業回数と作業の平均成功数を比較した。その結果、図2に示すように、自由視点の場合、固定視点の場合よりも平均作業回数は少ないが、平均成功数は多いことを示した。

また、自由視点ビデオと力覚メディア間の同期を端末間同期制御によって行うアルゴリズムを提案し、人の知覚限界の他に運用限界(知覚限界より狭く、同期誤差をこの範囲に収めて運用したい)を導入して、メディア内及びメディア間同期の高品質化を実現した。提案アルゴリズムでは、自由視点ビデオと力覚メディアを共にマスタメディアとして扱い、それらに端末間同期制御を適用して、メディア間同期誤差が知覚限界を出ると、運用限界に入るように制御する。実験によって、提案アルゴリズムの動き確認を行った。

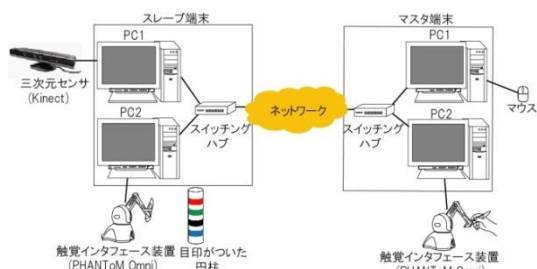


図1 自由視点ビデオ・力覚メディアを用いた遠隔制御システム

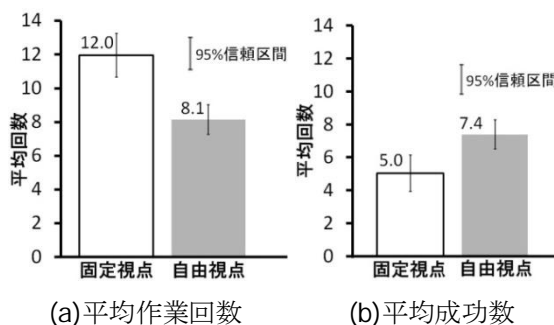


図2 平均作業回数と平均成功数の比較

(6)ビデオ・サウンド・力覚メディア伝送

ビデオ・サウンド・力覚メディア伝送システムを用いて、三つのメディア間の同期誤差が QoE に及ぼす影響を調査し、知覚限界(誤

差がこれより小さいと、ほとんどの人が知覚できない)や許容限界(誤差がこれを超えると、ほとんどの人が許容できない)などの人の知覚特性を明らかにした。また、同システムを用いて、鍵盤ハーモニカの演奏に合わせて、遠隔操作によってタンバリンを叩く遠隔合奏を行い、ネットワーク遅延が QoE に及ぼす影響も調査した。

(7)CG (Computer Graphics)・サウンド・力覚メディア伝送

遠隔ドラム演奏システムにおいて、先生が生徒にドラムの叩き方を教示する遠隔教育と、二人の利用者が一緒にドラムを演奏する合同演奏を扱い、ネットワーク遅延が QoE に及ぼす影響を調査した。また、合同演奏については、各端末でドラムを叩いたときに発生するサウンドを一定時間(ローカルラグという)だけ遅らせて出力する制御を適用したところ、ローカルラグにはネットワーク遅延(相手端末から自端末への遅延)に応じて最適値が存在し、その最適値は、必ずしもネットワーク遅延には等しくないことが判明した。これは、サウンドの同期品質だけでなく、インタラクティブ性も考慮する必要があるからである。

(8)CG・嗅覚・力覚メディア伝送

CG・嗅覚・力覚メディアを用いた果物狩りと遠隔生け花に対して、香り空間(香り発生源を中心とした球)を定義し、その空間内に視点が入ると香りが発生するようにし、香り空間の大きさが香り発生のタイミングの良さに及ぼす影響を調査した。その結果、香り空間の半径には、最適値が存在し、その最適値は、視点への移動方向と速度に依存し、視点に近づくときと、遠ざかるときで異なることが判明した。そこで、香り空間の半径を移動方向と速度に応じて動的に変更する動的出力タイミング制御を提案(特許として出願)し、その有効性を示した。

また、果物狩りを拡張して、果物狩り競争ゲームを行えるようにして、香り出力タイミングの違いが利用者間の公平性に及ぼす影響を調査した。その結果、香りが利用者に届くまでの時間の利用者間の差が約 700ms 以上のとき、公平性が損なわれることなどが明らかになった。

(9)CG・嗅覚・サウンド・力覚メディア伝送

CG・嗅覚・サウンド・力覚メディアを用いた果物狩り競争ゲームと、CG・嗅覚・力覚メディアを用いた遠隔生け花に対して、嗅覚、力覚、聴覚の有無を切り替えて、臨場感の評価を行った。評価では、SD (Semantic Differential) 法とともに評定尺度法を用いた。SD 法の結果に対して因子分析を行った結

果、三つの因子（評価性因子、活動・力量性因子（果物狩り競争ゲームでは活動・力量・迫力性因子）、操作性因子）が抽出された。抽出された因子と評定尺度法の結果との関係を重回帰分析によって調査したところ、第1因子（評価性因子）が最も大きく臨場感に寄与していることが明らかとなった。第3因子（操作性因子）については、二つのアプリケーションのどちらでも臨場感への寄与はそれほど大きくないことが示された。さらに、図3に示すように、嗅覚と力覚、力覚と聴覚が臨場感に与える効果は同程度であることが判明した。

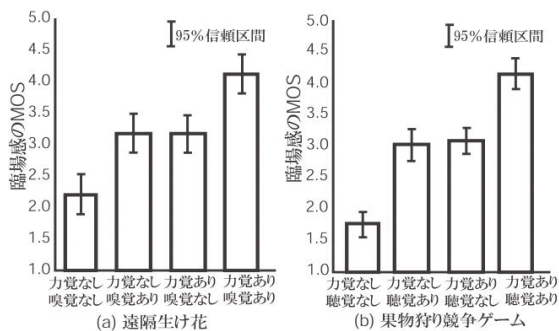


図3 臨場感のMOSの比較

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計11件）

①黄平国、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、分散仮想環境における香りの動的出力タイミング制御のユーザ体感品質評価、映像情報メディア学会誌、査読有、Vol. 66、No. 12、pp. J495-499、Dec. 2012

DOI: 10.3169/iej.66.J495

②Junya Osada、Yutaka Ishibashi、Nori shige Fukushima、Shinji Sugawara、QoE assessment in haptic teleoperation systems: Position-position versus position-force、David Publishing、Computer Technology and Application (CTA)、査読有、Vol. 3、No. 11、pp. 756-764、Nov. 2012

③ Pingguo Huang、Yutaka Ishibashi、Nori shige Fukushima、and Shinji Sugawara、QoE assessment of group synchronization control scheme with prediction in work using haptic media、International Journal of Communications, Network and System Sciences (IJCNS)、査読有、Vol. 5、No. 6、pp. 321-331、June 2012

DOI: 10.4236/ijcns.2012.56042

④宮下裕司、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、K. E. Psannis、多地点間の合唱におけるメディア同期のユーザ体感品質評価、映像情報

メディア学会、査読有、Vol. 66、No. 4、pp. J114-J118、Apr. 2012

DOI: 10.3169/iej.66.J114

⑤立松綾乃、劉勃海、福嶋慶繁、石橋豊、自由視点映像伝送におけるネットワーク遅延がユーザ体感品質に及ぼす影響、映像情報メディア学会誌、査読有、Vol. 65、No. 12、pp. 1742-1749、Dec. 2011

DOI: 10.3169/iej.65.1742

⑥Kai Iwata、Yutaka Ishibashi、Nori shige Fukushima、Shinji Sugawara、QoE assessment in haptic media, sound and video transmission: Effect of playout buffering control、ACM Computers in Entertainment, Special Issue on Advances in Computer Entertainment Technology、査読有、Vol. 8、issue 2、article 12、pp. 1-14、Dec. 2010

DOI: 10.1145/1899687.1899694

⑦立松綾乃、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、力覚メディア・サウンド・ビデオ伝送におけるネットワーク遅延とその揺らぎの影響、映像情報メディア学会誌、査読有、Vol. 64、No. 12、pp. 1873-1883、Dec. 2010

DOI: 10.3169/iej.64.1873

⑧澤祐一郎、福嶋慶繁、石橋豊、立体映像通信における画像間でのフレーム遅延が立体視へ与える影響、電子情報通信学会論文誌(D)、査読有、Vol. J93-D、No. 9、pp. 1672-1674、Sep. 2010

⑨渡邊達也、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、遠隔制御システムにおける力覚伝達方向の動的切り替え制御と切り替え時間の自動選択、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、査読有、Vol. 15、No. 2、pp. 251-262、June 2010

〔学会発表〕（計67件）

①Mya Sithu、Yutaka Ishibashi、Effect of local lag control on QoE in joint haptic drum performance、IEICE Technical Report、査読無、MVE2013-2、May 2013

②Yoshihiro Maeda、Yutaka Ishibashi、Nori shige Fukushima、Shinji Sugawara、Contribution of olfactory, haptic, and auditory senses to sense of presence in virtual environments、Proc. IEEE 2013 International Communications Quality and Reliability (CQR) Workshop、査読有、May 2013

③本多愛美、福嶋慶繁、石橋豊、画像・奥行き画像伝送方式を用いた自由視点映像伝送における視点情報のバッファリング制御の効果、電子情報通信学会総合大会、査読無、A-16-4、Mar. 2013

④三宮大弥、長田純矢、福嶋慶繁、石橋豊、自由視点映像及び力覚メディアを用いた遠隔制御システムにおける視点変更の効果、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、

CQ2012-87、Mar. 2013

⑤長田純矢、三宮大弥、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、端末間同期制御を用いたメディア間同期アルゴリズム、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、MVE2012-66、Jan. 2013

⑥Yutaka Ishi bashi、Sosuke Hoshi no、Qi Zeng、Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、QoE assessment of fairness between players in networked game with olfaction、Proc. ACM The 11th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames)、査読有、Nov. 2012

⑦Yusuke Hara、Yutaka Ishi bashi、Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、Adaptive delta-causality control scheme with dynamic control of prediction time in networked haptic game、Proc. ACM The 11th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames)、査読有、Nov. 2012

⑧Junya Osada、Nori shi ge Fukushi ma、Yutaka Ishi bashi、Influence of network delay on viewpoint change in free-viewpoint video transmission、Proc. The 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)、査読有、pp.110-115、Oct. 2012

⑨Kazuki Matsunaga、Yutaka Ishi bashi、Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、Effect of adaptive reaction force control in remote control system with haptic media and video、Proc. The 27th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)、査読有、July 2012

⑩劉勃海、福嶋慶繁、石橋豊、立体映像通信におけるスライス数がQoEに及ぼす影響、電子情報通信学会総合大会、査読無、B-11-9、Mar. 2012

⑪曾キ、岩田海、石橋豊、福嶋慶繁、菅原真司、力覚メディア・サウンド・ビデオを用いた遠隔合奏におけるネットワーク遅延がQoEに及ぼす影響、情報処理学会全国大会、査読無、3Y-5、Mar. 2012

⑫劉勃海、岩田海、福嶋慶繁、石橋豊、"立体映像通信における誤り補償の効果、" 電子情報通信学会技術研究報告、査読無、CQ2011-44、Nov. 2011

⑬ Yuji Kusunose、Yutaka Ishi bashi、Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、QoE comparison of competition avoidance methods for management of shared object in networked real-time game with haptic media、Proc. the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'11)、査読有、Nov. 2011

⑭ Ayano Tatematsu、Yutaka Ishi bashi、

Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、QoE assessment in tele-operation with 3D video and haptic media、Proc. IEEE ICME'11 Workshop on Hot Topics in Multimedia、査読有、July 2011

⑮ Sosuke Hoshi no、Yutaka Ishi bashi、Nori shi ge Fukushi ma、Shinji Sugawara、QoE assessment in olfactory and haptic media transmission: Influence of inter-stream synchronization error、Proc. IEEE 2011 International Communications Quality and Reliability (CQR) Workshop、査読有、May 2011

⑯Shuliang Lin、Yuichi ro Sawa、Nori shi ge Fukushi ma、Yutaka Ishi bashi、Influences of frame delay and packet loss between left and right frames in stereoscopic video communications、Proc. the 28th Picture Coding Symposium (PCS)、査読有、pp.510-513、Dec. 2010

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 三次元仮想環境システムにおける香り発生方法及び三次元仮想環境システム

発明者: 石橋豊、黄平国、仙名大樹

権利者: 名古屋工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-250564

出願年月日: 2011年11月16日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://nma.web.nitech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 豊 (ISHI BASHI YUTAKA)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40252308

(2) 連携研究者

福嶋 慶繁 (FUKUSHIMA NORISHIGE)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号: 80550508