

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300086

研究課題名(和文)遠隔操作における三次元視聴触覚フィードバック

研究課題名(英文)Three dimensional visual-auditory-tactile feedback for teleoperataion

研究代表者

矢向 高弘 (Yakoh, Takahiro)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：20286652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：3Dの視聴触覚情報を遠隔提示する実験装置を構築した。視覚はステレオカメラ情報を3Dモニタに提示、聴覚は操作対象を画像認識した信号に基づく合成音を4チャンネルスピーカーに提示、触覚は2自由度のプレートロボットとジョイスティックの角度をバイラテラル制御することで位置と力覚とを提示した。人工的な遅延時間や合成音などの感覚提示条件を様々に設定した上で、被験者に遠隔作業を実施させ、作業効率や操作性を評価した。実験結果から、通信遅延の下で、三次元空間で遠隔操作を遂行する際に知覚すべき因子として、奥行きや速度、加速度の情報を聴覚で提示することが効果的であることなどの知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：An experimental system, which can represent 3D visual-auditory-haptic information of its slave side to its master side, was constructed. The visual information captured by a stereo camera was displayed on a 3D monitor, the artificially-generated auditory information based on a target information measured by a visual recognition system was played from a 4-channel speaker, and the haptic information was transmitted via a bilateral controller which established 2-DoF position tracking and action-reaction law between a plate robot and a joy-stick. Task efficiency and operability were evaluated through remote-operation tests conducted by human examinees under various conditions of delay and generated audio. The results verify that depth, velocity, or acceleration information is worth representing as audio information especially under communication delay.

研究分野：実時間通信

キーワード：遠隔ロボット操作 バイラテラル制御 視聴触覚伝送 実時間通信 ヒューマンインタフェース

## 1. 研究開始当初の背景

(1)コンピュータ・ネットワークの利用目的は拡大の一途であり、近年はデータや音声・映像などのマルチメディア情報のみならず、触覚情報や臨場感情報など様々な情報を伝送することが社会的に切望されている。実際、オブザーバ技術に基づくバイラテラル制御技術の急速な発展に伴い、鋭敏な触覚を操作者に伝達することが可能な医療用の鉗子システムが開発されており、ネットワークを介して鋭敏な触覚を伝送する実験が始められている。また認知科学の分野においては、2000年頃から感覚間の相互作用が注目され始めて、各国で類似のプロジェクトが立ち上がっている。触覚との相互作用に関しては、鋭敏な触覚を遠隔実現する機構の実現が困難なために未開拓分野として残されているが、触覚を含む新たなコミュニケーション形態として広範な応用が期待できる重要な分野であり、世界に先駆けて早期に着手することが望まれる。しかし、これまでの通信技術とハプティクス技術を融合するには未解決の課題がある。音声や映像は本質的に一方向性の情報であり、どれほど遅延時間が長くとも遅延の揺らぎがなければ滑らかに感じることができる。しかし触覚は本質的に双方向性の情報であり、しかも与えた力に対する反力が戻されてはじめて感じられるという実時間性を伴うものである。したがって、通信遅延とその揺らぎの両方が低く抑えられたネットワークを用いなければ、質の高い触覚を伝送することはできない。これまでのネットワーク品質保証の分野では、通信遅延を犠牲にすることにより揺らぎや帯域幅を保証する技術の研究に注力されており、通信遅延の保証技術に関しては未着手と言っていい状況にある。また制御の分野では通信遅延をモデル化したり観測したりして適応する技術が研究されているものの、揺らぎに関しては散見しない。このように、通信遅延時間と揺らぎの保証技術や、適応技術の開発が求められている。

このような背景から、研究代表者はこれまで通信遅延時間と揺らぎを保証するための通信技術と、ロボティクス分野への応用技術との両面から研究してきた。TDMAのタイムスロットを同期することにより、マルチホップネットワークでの通信遅延時間を原理的に最小かつ一定に保証する技術は、現在Time Triggered Ethernetに組み入れられ標準化が進んでいる。また、遠隔バイラテラル制御に関しては、前例のない優れた触覚伝送が実現できており、世界的に注目されている。しかし地理的に遠隔地へ伝送する際に遅延時間や揺らぎをゼロにすることは物理的に不可能である。そこで、感覚提示には個別の遅延時間があることを前提とした時、全体として人間の操作性はそれほど低下しないような通信遅延時間の組み合わせが存在するのではないかと、の着想から、2006年度に得た基盤C「視聴触

覚の再生に基づく遠隔操作の品質保証技術」において様々な通信遅延時間を与えた際の操作性の差異について研究を実施した。この結果から、例えば人間は視覚に強く依存しているにも拘らず、残像などの影響から視覚が200ms程度遅延するまでは操作性の低下は小さいが、触覚は50ms程度遅延しただけでも極端に操作性が低下することなどを明らかにした。また聴覚は時刻の通知を知覚する精度は極めて高いことも改めて明らかにした。さらに、2008年度に得た基盤B「視聴触覚フィードバック遠隔操作における装飾器の性能評価」においては、先行到着する感覚情報を用いて後続する感覚の提示を装飾することにより、感覚伝送が遅い場合でも操作性の低下を克服可能であることを突き止めた。これは、物理的理論限界である通信条件の克服が可能であることを意味する画期的な成果であり、原理究明と一般化が切望される。しかるに、以上の実験環境は、遅延時間や揺らぎなどの通信条件に関しては自ら構築した通信環境エミュレータにより模擬したものであり、また遠隔操作の内容は1自由度しか有していない極めて限定されたものであったため、この実験結果に懐疑的な意見も寄せられていた。そこで本研究課題では、触覚伝送系を2自由度に拡張し、視覚および聴覚の伝送については3次元情報として提示できるように再構成することで、多彩な遠隔操作を実験対象に採用できる環境を整える。通信環境についてはネットワーク分野で一般的に用いられているハードウェア型の通信環境エミュレータを導入する。以上のように実験環境を改良することにより、実験結果の一般性を確保するとともに、装飾器に関する更なる提案と実験的検証を重ねていくことが本研究の目的である。視覚に対する装飾方法については、既に拡張現実感の分野などで提案があるが、遅延時間と操作性に関する定量的に評価した例は見ない。例えば自動車の計器類の視認性に関する研究は枚挙に遑がないが、視覚情報に遅延時間があることを前提とした提示方法を与える先行研究は見ない。また、3次元提示が可能な時に、着目している対象物をどの程度の奥行きに提示すべきか、装飾器の奥行きをどのように設定するかなどについて、実験的に検証している例はない。さらにまた、聴覚情報に遅延時間がある場合についても、現実時刻で特定の装飾音を合成することにより、現実状況の変化時刻を正確に操作者へ知覚させることができると考えているが、どのような装飾音をどの程度の時間だけ合成するのが適切なのかを突き止めることが重要である。本研究を実施することにより、仮想現実感・拡張現実感の両方の分野に関して、操作に対する効果的な装飾方法とは何かを定量的に示し、さらに一般化した設計論を構築することが期待される。

(2)本研究では、触覚情報の伝送遅延が視覚情報および聴覚情報のそれよりも短いことを前提とし、触覚情報から得られた位置・速度・

加速度という力学的な情報に基づいて視覚情報や聴覚情報に装飾を与えることを基本手法とする。それらの情報に基づいた様々な装飾方法を試みながら、効果的な装飾とは何か、制御行動のために人間が知覚すべき情報は何か、などを探求していく。特に3次元提示が普及期に入っている現在、着目している対象物をどの程度の奥行きに定位させるかという問題は、本研究課題の大きな探求課題である。これまでの3次元コンテンツは、制作者の意図だけで奥行きが設定されてきたが、着目している対象物体の奥行きが頻繁に変化すると早く目が疲労することが知られている一方で、着目している対象物体自体を操作者が変更したときに奥行き設定が勝手に変化しても使いづらくなるだろうと懸念され、遠隔操作において奥行き感をいかに設定するかという問題は多くの実験結果からのみ低減できる設計指針と思われる。また、縮尺が重要な操作内容であれば、奥行きと上下・左右の縮尺感を一致させるべきであろう。感覚毎に遅延時間が異なるという前提がネットワーク性能を引き出すのに有効な方法であり、その環境において提案する設計論に基づく装飾器の構成が通信遅延時間による操作性の低下を十分に抑えることができることを実証する。

(3)本研究課題では、触覚や視覚・聴覚という複数のメディアの伝送を用いてそれらの感覚を遠隔提示するシステムを用いて、システム全体の操作性を評価指標として提示技術の評価する点に特色がある。この3メディア伝送装置については1自由度システムについては完成しており、この研究成果を出発点とした発展段階として本研究課題を申請した。通信遅延時間の差異を活かして装飾器を施すという着想は、この前段階の研究があつてはじめて得られるものであり、世界的にも例のない独創的な点である。感覚間の相互作用の探求は先に述べたように認知科学分野における近年注目されている課題であるが、触覚を含む相互作用や、これの擬似的短縮に関する研究はまだ見ない学際的にもユニークな着想であり、新たな知見の獲得が期待できる。この研究成果の応用分野としては、極限環境などにおける遠隔操作などに留まらず、例えば腹腔鏡手術などの低侵襲医療用機器や、自動車分野で電子制御化が進められているSteering by Wireなど遠隔地ではないが動作遅延が想定される機器のインタフェース、通信型ゲームなどの民生品分野など、幅広く想定されており、今後発展が見込まれる多角的方面の機器に関する操作インタフェースのユニバーサルデザイン設計手法へと展開していくことが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、視覚・聴覚・触覚を3次元情報として遠隔伝送する実験装置を構築し、これを用いて人間に遠隔作業を実施させ、主に作業効率や操作性などの観点から提示方法に関する

評価を行うものである。感覚を3次元として提示する際の設計パラメータを変化させることにより、遠隔操作を効率よく支援する3次元提示する方法を探求する。また、これまで行ってきた通信環境の劣化に起因する操作性低下を克服する技術についても、3次元の装飾器を提案し、実験的検証を行う。さらに、これらの実験成果を総括し、人間が通信遅延の下、3次元空間で遠隔操作を遂行する際に知覚すべき因子を突き止め、一般化し、動作遅延を伴う機器全般に関する遠隔操作インタフェースの設計論を構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)まず、既に構築している視聴触覚の伝送が可能な遠隔操作システムを3次元に拡張した遠隔操作システムを構築した。遠隔側の操作対象は図1に示すプレートロボットであり、プレートの角度が2自由度で制御可能である。このプレート上で転がる球の位置を操作するというball on plate作業を想定したものである。操作側で操縦者が使用するのは図2に示すジョイスティック形状の装置であり、単にエンコーダで角度を読み取れるだけでなく、モータにより力覚を提示できるようになっている。これら2つを実時間通信を含むバイラテラル制御系で接続することにより、2自由度の触覚伝送が可能とした。

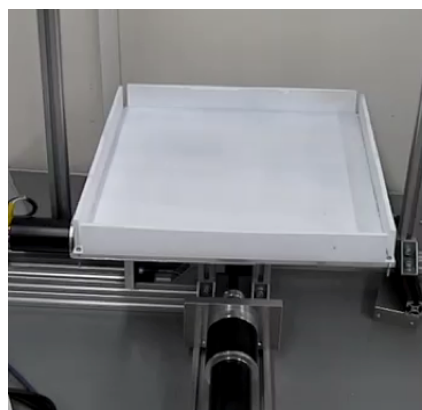


図1 プレートロボット



図2 ジョイスティック

視覚伝送装置は、カメラを接続した撮像側とディスプレイモニタを接続した再生側の2台のコンピュータシステムで構成し、互いを1Gbpsのイーサネット接続した。基本通信プロトコルとしてはUDPを採用し、画像圧縮とパケットのパッキングに対しては四分木構造のブロック分割法を適用することで、通信による再生遅延の低減を行った。視覚情報を取得するためのカメラには図3に示す2台のUSB 3.0接続のビデオカメラを組み合わせたステレオカメラを、視覚情報の提示するためのモニタには3Dメガネによる立体視が可能な3Dモニタを使用し、視覚映像の伝送を可能にした。



図3 ステレオカメラ

聴覚伝送装置はカメラによる画像認識を行う遠隔側と、画像認識した信号に基づく合成音をスピーカーに提示する再生側の2台のコンピュータシステムで構成し、互いを1Gbpsのイーサネット接続した。画像認識用のカメラは上記ステレオカメラとは別のものであり、プレートロボット全体を上から俯瞰するように設置した。画像認識はプレート上を転がって移動する球に対して行い、プレート上の球の位置・速度・加速度をリアルタイム検出した。合成音の提示には計4台のスピーカーで構成される4チャンネルスピーカーを使用し、操縦者の前後左右の4箇所それぞれ均等に配置することで聴覚の三次元での提示を可能にした。合成音の生成は、画像認識した信号に基づいて各チャンネルの音量と周波数のパラメータを変化させることを行った。

聴覚伝送装置は上述のマスタ側、スレーブ側から成る2つのロボットシステムをバイラテラル制御系で接続することで構成した。制御には位置情報と力覚情報を互いにフィードバックする4chバイラテラル制御を用いた。ロボットシステムのセンサにはモータの回転角を計測するロータリーエンコーダのみを用い、力覚情報は外乱オブザーバを実装することで力センサを用いることなく算出した。マスタ・スレーブ間の通信には、過去に提案・開発を行った実時間通信機構を使用した。この通信機構はイーサネット用のドライバとして実装がされており、1つの通信ケーブルで制御用の実時間通信と、IP通信を多重

化して行うことのできる独自のシステムである。本システムではこの通信機構に調整を施した上で実装した。

(2)構築した遠隔操作システムを用いて、通信を介したバイラテラル制御を実際に行い、マスタ・スレーブロボットの動作確認及び性能評価を行った。遠隔制御はジョイスティックを1自由度で操作する場合と、2自由度で操作する場合で行い、その際のプレートロボットの位置追従性能とジョイスティックへの提示トルクを計測した。

(3)構築した遠隔操作システムを用いて、球をプレート上の目標位置で静止させるという遠隔作業を実際に行い、その際の操作性の評価を行った。定量的な評価の指標としては、作業の達成時間や球の総移動量、平均入力トルクを利用した。また、定性評価として被験者へのアンケートも行った。実験条件としては、人工的に発生させた視覚の再生遅延と、合成音の生成方法を変化させ、それぞれの場合で実験を行った。合成音には球の位置・速度・加速度情報のいずれかを利用し、音量または周波数パラメータを変化させた。

#### 4. 研究成果

(1)遠隔バイラテラル制御による動作確認の結果、マスタ・スレーブロボット共に2つの回転軸を独立して、かつ同時に制御可能であることが確認できた。プレートロボットの追従性能についても、金属球などの負荷がプレート上に存在している場合であっても操縦者が遠隔作業を問題なく実行することができた。また、外乱オブザーバから推定したプレートロボットにおける反力をマスタシステムに伝送し、ジョイスティックから力覚情報として操縦者に提示することも実際に確認することができた。システム間の通信は、実装した実時間通信機構によって、制御信号用の実時間通信と同時に観測データ用のIP通信も多重化して行っており、この通信機構が遠隔制御において実用可能であることが分かった。

(2)遠隔作業実験の結果から、3次元空間での遠隔作業において、位置情報よりも速度情報、あるいは加速度情報を聴覚に提示する方法が有効であることが明らかになった。特に、操作性が著しく低下するように視覚情報に人工的な遅延を400ms程度生じさせた場合であっても、速度と加速度の情報を聴覚に提示することにより、円滑に遠隔作業を遂行することが分かった。

(3)今後の展望としては、3次元空間での遠隔作業における視聴触覚の提示遅延が操作性に与える影響を検証することがまず挙げられる。特に今回の研究では行っていない聴覚と触覚の提示遅延、そして視聴触覚の遅延の相互作用に関する検証が考えられる。また、3次元空間での作業に対応した、視聴触覚提示に施す装飾器の提案・実装も検証の価値があるだろう。



## 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 4 件)

- ① 阿部太紀、矢向高弘、時間周波数推定に基づく送信ブロック画像選定手法、電気学会論文 C, Vol.134, No.12, pp.1888-1896, 2014. 査読有
- ② 坂本尚志、矢向高弘、近視領域作業のための可変輻輳機構を持つ立体視システムの設計と評価、電気学会論文 D, Vol.134, No.9, pp.792-800, 2014. 査読有
- ③ 上田和樹、鞠谷達士、矢向高弘、多重リングバッファ機構を用いた実時間通信と IP 通信との両立手法、電気学会論文 C, Vol.134, No.8, pp.1031-1038, 2014. 査読有
- ④ 齋藤大地、矢向高弘、帯域制約に適応する多重記述符号化、情報処理学会論文誌、Vol.53, No.5, pp.1489-1498, 2012. 査読有

[学会発表] (計 17 件)

- ① 吉原大輔、矢向高弘、感覚提示の有効性の検証を目的とした遠隔作業環境の実装、情報処理学会第 78 回全国大会、Vol.3, pp.221-222, 3月10-12日、2016. 慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市)
- ② 太田原香菜、矢向高弘、S-TDMA スイッチングハブの実装とその評価、情報処理学会第78回全国大会、Vol.3, pp.203-204, 3月10-12日、2016. 慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市) 3. 唐土慶太、矢向高弘、データリンク層の周期的な途絶が TCP のスループットに与える影響、情報処理学会第 78 回全国大会、Vol.3, pp.201-202, 3月10-12日、2016. 慶應義塾大学 (神奈川県・横浜市)
- ③ 鞠谷達士、矢向高弘、実時間 0S 間の高精度時刻同期機構の実装と評価、第 58 回自動制御連合講演会、7 pages, 11月14-15日、2015. 神戸大学 (兵庫県・神戸市)
- ④ Ning Zhang, Takahiro Yakoh, Selective Sending Block Determination Method Based on Quad-Tree Structure for Live Video Streaming Systems, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), pp.2367-2371, November 9-12, 2015. Pacifico Yokohama (Kanagawa Yokohama)
- ⑤ 片山風人、矢向高弘、可視光通信のソフトウェア無線技術による適応制御に関する検討、情報処理学会第 77 回全国大会、Vol.3, pp.343-344, 3月17-19日、

2015. 京都大学 (京都府・京都市)

- ⑥ 丸山大貴、矢向高弘、顕著性マップを用いて無線帯域変動に適応するライブビデオストリーミングシステム、情報処理学会第 77 回全国大会、Vol.3、pp.135-136, 3月17-19日、2015. 京都大学 (京都府・京都市)
- ⑦ Kazuki Ueda, Tatsushi Kikutani, and Takahiro Yakoh, Parallel Implementation of Real-Time Communication and IP Communication by using Multiple Ring Buffers, IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2014), pp.1-8, May 5-7, 2014. Toulouse (France)
- ⑧ Hiroaki Nishijima, Takahiro Yakoh, Minimum Delay Switch for Synchronous TDMA Network, IEEE International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics (ICCSII 2012), pp.1-6, December 18-20, 2012. Dubai (UAE)
- ⑨ Ryuta Shiomi, Daiki Abe, Takahiro Yakoh, Multiple Description Coding with Delta-Sigma Modulation, IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2012), pp.863-868, July 25-27, 2012. Beijing (China)

[図書] (計 1 件)

- ① Takahiro Yakoh, Rhythmical, Dizzying, or Boring Street: Frequency Analysis to Townscape Impression, Mn'M Workbook 3, flick studio, pp.42-47, 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.sd.keio.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢向 高弘 (YAKOH TAKAHIRO)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号：20286652