

Title	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
Sub Title	Performance evaluation of decorators for a teleoperation with visual-auditory-tactile feedbacks
Author	矢向, 高弘(Yako, Takahiro)
Publisher	
Publication year	2011
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2010.)
JaLC DOI	
Abstract	遠隔操作システムの操作性は、操作者に提示される情報の質に依存するが、通信に起因する提示遅延は避けることができない。そこで、より低遅延で届く情報を用いて高遅延で届く情報を装飾することで、システム全体の遅延に対する影響を緩和しようとするのが本研究の着想である。本研究では、視覚・聴覚・触覚の提示それぞれの提示遅延を任意に設定可能な遠隔操作システムを開発した。これを用いて様々な提示遅延条件下での操作性低下を実験的に調査した結果、視覚提示遅延は200msを超えると劇的に操作性が低下することなどの基礎データを得ることができた。また触覚情報を用いて視覚・聴覚情報を装飾することにより、200msを超える提示遅延環境下での操作性を大幅に改善できることなどの提案手法の有効性を検証することができた。
Notes	研究種目：基盤研究(B) 研究期間：2008～2010 課題番号：20300079 研究分野：実時間処理・コンピュータ通信・ヒューマンインタフェース 科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_20300079seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20300079

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Performance Evaluation of Decorators for a Teleoperation with Visual-Auditory-Tactile Feedbacks

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

研究成果の概要（和文）：遠隔操作システムの操作性は、操作者に提示される情報の質に依存するが、通信に起因する提示遅延は避けることができない。そこで、より低遅延で届く情報を用いて高遅延で届く情報を装飾することで、システム全体の遅延に対する影響を緩和しようとするのが本研究の着想である。本研究では、視覚・聴覚・触覚の提示それぞれの提示遅延を任意に設定可能な遠隔操作システムを開発した。これを用いて様々な提示遅延条件下での操作性低下を実験的に調査した結果、視覚提示遅延は 200ms を超えると劇的に操作性が低下することなどの基礎データを得ることができた。また触覚情報を用いて視覚・聴覚情報を装飾することにより、200ms を超える提示遅延環境下での操作性を大幅に改善できることなどの提案手法の有効性を検証することができた。

研究成果の概要（英文）：Although the operability of a teleoperation system depends on the quality of information feedback to its operator, the feedback delay caused by communication is avoidable. So the key idea of this research is to decorate long-delay information with short-delay information to reduce the degradation of operability caused by communication delay. Firstly, this research developed a teleoperation system with visual-auditory-tactile feedback mechanism these feedback delays are independently customizable. Fundamental knowledge, such as visual feedback over 200ms delay drastically degrades its operability, can be obtained during experiments under combinational delay conditions. Furthermore, the proposals, such as visual-decorator and auditory-decorator based on tactile information can reduce the degradations of operability caused by the communication delay, are verified with experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2008 年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2009 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総 計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：実時間処理、コンピュータ通信、ヒューマンインタフェース

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：感性認知科学、遠隔操作、視聴触覚フィードバック、マルチメディア通信、装飾器、バイラテラル制御

1. 研究開始当初の背景

インターネットと携帯電話回線網の両方において、ネットワークは利用者数、接続台数、大域幅ともに急成長し、利用目的も著しく拡大している。これに伴い、データや音声・映像など従来型のマルチメディア情報のみならず、触覚情報や臨場感情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などが開発されており、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。しかし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方向性の情報であり、どれほど遅延時間が長くとも揺らぎがなければ滑らかに感じるができる。しかし触覚は本質的に双方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が、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、応募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の両面から研究してきた。TDMAのタイムスロットを同期して割り当てすることにより、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。また広域通信での実時間通信を実現すべく複数経路を用いた通信品質保証技術を開発してきた。また遠隔バイラテラル制御に関しては、例のない優れた触覚伝送が実現されてきており、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するが、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この着想から、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している。この実験結果から、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200ms程度の遅延までは操作性の低下は小さいが、触覚は50ms程度でも遅延しただけで極端に操作性が低下することなどが明らかになってきた。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なった。

これらの研究成果から、許容された通信遅延時間の条件下で、例えば視覚と触覚との遅延時間差内に触覚情報を解析し、視覚情報に装飾を与えることで更に操作性の低下を克服できるのではないかとこの着想に至った。また、操作状況の変化時刻に聴覚情報へ装飾を与えることで、操作性を向上することさえ可能になるのではないかとこの可能性を見出していた。さらにまた、これらの成果を一般化することにより、遅延時間を伴う遠隔操作系において人間が操作する際の操作性低下を克服する新しい技術分野を開拓することが期待された。

2. 研究の目的

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した。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、などを探求した。また、当時ウィーン工科大学との間でインターネットを介した遠隔操作の共同実験を進めており、この枠組みを利用してインターネットを介した国際遠隔操作の実証実験を行った。具体的には実験装置の一方をオーストリアへ輸送し、日本—オーストリア間での遠隔操作実験を遂行した。この際、PlanetLabというオーバーレイネットワークの研究環境を利用して二国間での複数経路を用いた通信保証技術を利用することにより、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目的とした。

3. 研究の方法

(1)まず、視聴触覚各々の再生遅延時間を独立に設定できる遠隔操作システムを構築した。ここで、視覚・聴覚・触覚いずれか一つ感覚だけを操作者に提示しても操作が遂行可能なタスクを設定しておくことで、様々な通信環境下での実験を行うことができるようになる。そこで、上図のように単純な一軸の作業を取り上げることにした。ここで、遠隔側のルールと操作側の操作棒とは触覚伝送が可能なバイラテラル制御系で結合しており、操作棒を操作することで球の位置を制御するというタスクを設定した。

①視覚伝送装置は工業用カメラとコンピュータとを高速なインタフェースで接続した撮像側と高速に描画が可能な再生側という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。再生遅延を設定可能とするためにはTCPの送受信キューや再送処理を回避する必要があったため、基本通信プロトコルとしてUDPを採用した。しかしこの場合はパケット欠損への対応をアプリケーション内で行う必要が生じるため、画像圧縮方式とパケットへのパッキング方式について再生遅延を規範とした最適設計を行った。以上の2つのシステムの間ネットワークシミュレータを設置することにより、任意のネットワーク環境において再生遅延を最小化するビデオストリーミングシステムを構築した。

②聴覚伝送装置は環境音をサンプリングする録音側とスピーカーやヘッドホンで発音する再生側との2台のコンピュータシステムで構成し、①と同様にネットワーク接続した。ここで、マイクロホンを用いて遠隔側の環境音をサンプリングするだけでは聴覚だけによる操作が困難であったため、環境をレーザ計測し音程や音量に反映した人工環境音を発生する機構を構築し、これも聴覚情報として扱うことにした。

③触覚伝送装置は先に述べたようにバイラテラル制御系で接続された2個一対のロボットシステムである。遅延が短い場合には双方の力覚情報と位置情報とを互いにフィードバックする4チャンネルバイラテラル制御を用いた。遅延時間が長い場合には4ch制御系が不安定になるため、操作側の力覚情報を除いた3chバイラテラル制御を用いた。より繊細な力覚情報を伝達するため、ダイレクトドライブモータの回転軸を減速せずに利用した。センサには高精度のロータリーエンコーダだけを用いて位置を計測し、外乱オブザーバにより力センサレスで力を算出した。

(2)基礎実験評価方法としては、球を目標位置で静止させるまでの操作時間を測定し、これ

が短いほど操作性が高いと仮定して操作性の指標とした。実験条件としては、まず視覚・聴覚・触覚いずれか一つの感覚だけを様々な遅延時間で操作者に提示した場合の操作時間を測定することで、各感覚が操作に対して有する基本的な操作性支援能力を測定した。次に複数の感覚を様々な遅延時間の組合せで操作者に提示することにより、各感覚の操作性支援能力の複合作用を調査した。(3)装飾器の実験評価方法としては、基礎実験の結果に基づいて、遅延に対する操作性低下の著しい触覚伝送を最短の通信遅延で伝送できる状況を想定した。視覚および聴覚の伝送はそれに対して遅れるため、触覚情報を用いて視覚や聴覚を装飾する装飾器を実装した。これらの装飾器の有無に応じた操作時間を比較することにより、通信遅延による操作性低下を装飾器が抑止しうるかどうかを評価することにした。

(4)実際のインターネットを利用して広域通信環境下での評価を行うために、PlanetLabを用いて実時間通信の方式について検討し、実装と評価を行った。実時間通信を行うためには送信パケット毎に確認応答を必要とするTCPプロトコルは適していない。その一方でよく利用されるUDPプロトコルは、パケットの損失に対処できない。そこで、複数経路通信を採用することにより、この損失の減少を目指した。またさらにMDC符号化を用いることにより、パケット損失時の影響を減少させることを試みた。

4. 研究成果

(1)基礎実験の結果から、以下の事柄が知見として得られた。

①どの感覚の再生遅延時間を延長しても操作性の低下を招くが、感覚毎の操作性低下の様子を比較した結果、触覚が最も著しく操作性の低下を招くことが明らかになった。また、触覚伝送システムが通信を含んだクロズドループ制御であるため、4chバイラテラル制御器では10ms程度の遅延時間で不安定になることがわかった。そのため本評価では、通信遅延を与えた場合には3chバイラテラル制御を利用した。遅延をループ内に含む制御系の安定化については、スミス補償器や通信外乱オブザーバを導入するなどの解決の糸口が見出されている。また通信遅延のネットワークモデルを単純な待ち行列と見なしてフロー制御を行うことにより、この不安定化を克服する手法を得ることができたことも本研究の成果の一端である。なお、視覚と聴覚の伝送はオープンループ制御であり、伝送自体が不安定になることはなかった。

②視覚伝送システムを構築するにあたり、通信遅延時間の保証を目指したビデオ伝送システムの研究が見出せなかったため、これを

構築すること自体が本研究の成果となっている。本提案手法は、再生遅延を1フレームの撮像遅延未満に抑えることができおり、緻密な遠隔制御を実施する際の有力な支援ツールになりうるということが実験的にも検証されている。符号化遅延を短縮するために時間軸方向の差分圧縮技術は採用していないが、フィールドをブロック分割してブロック毎に優先度付けして伝送する仕組みを取り入れたことにより、時間軸方向の差分圧縮に匹敵する圧縮率を実現した。本手法はその原理上、実時間OS上で動作させることが必要であるが、解像度の向上に伴い圧縮処理時間がフレームレートに追いつかない状況が予想された。そこで、実時間OS内で高速処理を実現するための手法としてGPUの援用手法を検討した。GPUは本来、画像処理を高速処理することに特化して開発された処理装置であるが、近年これを一般計算に応用する試みが行われている。本研究ではこれを発展させ、実時間処理の中で利用可能にすることに成功した。CPUからのGPUの利用方法を詳細に分析し、利用方法に指針を設けることにより、実時間処理の中でGPUを援用利用する手法を考案したのである。これも本研究の大きな成果である。

③聴覚伝送システムを構築するにあたっては、現実の環境音に加えて人工環境音と装飾音とを重畳させることになるため、どのような人工環境音と装飾方法が適切かを評価した。人工環境音として従来法に準じて正弦波の周波数および左右の音量を想定し、これに加える装飾方法として和音（複合音）とサイレンなどの装飾音の両方を比較検討した。まず、人間の音のある・なしに対する知覚時間と、複合音の協和音・不協和音の知覚時間とを複数の被験者を対象として調査した。その結果、音のある・なしに対する知覚時間は20ms程度と短時間で知覚できる一方で、複合音が協和音か不協和音かを知覚するには300ms以上を必要とすることが分かった。このことから、提示したい情報を音のある・なしという符号に重畳することにより、視覚の知覚時間より短時間で情報を提供することができることを確認できた。その一方で、複合音の音色による情報提示は、知覚に300ms以上を必要とすることから、時定数の長い制御系にのみ利用すべきであることが示された。今回の制御系は時定数の短い制御系であるため、環境音に重畳した複合音を利用するのは適切ではなく、環境音と独立した装飾音を重畳するのが適切という設計指針が得られた。

(2) 装飾器の実験評価から、視覚や聴覚の提示遅延が200msを超える際には、触覚情報に基づく装飾器を援用することにより、操作性の低下を抑止することができた。このこと

は正に本研究の目的を達成した証である。

(3) 複数経路通信の研究の結果、効率の良い経路探索アルゴリズムを実装することができた。基礎となるインターネットに改変を与えずに複数経路を利用するためには、経路毎に中間ノードを1台選定して経由させる方法が最も簡便である。本研究の実装方式では、数ある中間ノードの全てを中間ノードの候補とするのではなく、ここに地理的な情報を取り入れることにより、探索空間を絞り込む。その結果、現実的な応答時間で複数経路を提供できる仕組みを構築することが可能となった。またMDC符号化に関する研究の結果、変動する各経路の帯域幅に応じて各符号に含める情報量を調節することが可能な符号化方式を構築した。

(4) 今後の展望としては、より自由度の高い遠隔操作において、どのような装飾を施すことができるかという多自由度問題への展開が考えられる。また、視覚や聴覚を信号処理することにより状況把握を行い、触覚提示に装飾を施す手法についても検討する価値がある。さらにまた、インターネットに限らず、携帯電話網など様々な物理層を複数並列に利用することができるになれば、走行中の救急車からの通信などでも利用可能な視聴触覚通信を実現することも視野に入るだろう。

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1件)

- ① 矢代大介、久保亮吾、矢向高弘、大西公平、ネットワークを介したサーボ制御のためのPI制御器を用いた端末間フロー制御、電気学会論文誌D、査読有、Vol.130, No.3, p.268-276, 2010.

〔学会発表〕(計9件)

- ① D.Saitoh, T.Yakoh, Ratio Configurable Multiple Description Correlating Transforms Coding, IEEE International Conference on Industrial Technology, p.352-357, 2011年3月14日, Auburn, AL, U.S.A.
- ② K.Koyama, T.Yakoh, Feasibility Study of GPGPU Acceleration for PC-based Control, 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, p.560-563, 2010年11月24日、横浜
- ③ W.Motooka, et al., 12名中9番目, Development of 16-DOF telesurgical forceps master/slave robot with haptics, IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society,

p.2081-2086, 2010 年 10 月 10 日, Glendale, AL, U.S.A.

- ④ D.Yashiro, T.Yakoh, K.Ohnishi, Data transmission using priority queue for multi-DOF haptic communication, 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, p.70-75, 2010 年 3 月 22 日, 新潟県長岡市.
- ⑤ J.Iwatani, T.Yakoh, A detection method of active queue management in communication paths, IEEE International Conference on Industrial Technology, 1009-1013, 2010 年 3 月 15 日, Viña del Mar - Valparaiso, Chile
- ⑥ D.Chirnanthavat, T.Yakoh, Hybrid Multipath Routing for Packet Distribution using Ant Colony Optimization, 6th International Conference on Information Technology and Applications, CD-ROM 6 pages, 2009 年 11 月 12 日, Hanoi, Vietnam.
- ⑦ K.Endoh, K.Yoshida, T.Yakoh, Low Delay Live Video Streaming System for Interactive Use, IEEE International Conference on Industrial Informatics, p.1481-1486, 2008 年 7 月 16 日, Daejeon, Korea.
- ⑧ S.Hamasaki, T.Yakoh, Implementation and Evaluation of Decorators for Delayed Live Streaming Video on Remote Control System, IEEE International Conference on Industrial Informatics, p.1220-1225, 2008 年 7 月 16 日, Daejeon, Korea.
- ⑨ T.Ishida, T.Yakoh, Fault Tolerant Multipath Routing with Overlap-aware Path Selection and Dynamic Packet Distribution on Overlay Network for Real-Time Streaming Applications, IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, p.287-294, 2008 年 5 月 22 日, Dresden, Germany.

〔図書〕(計 2 件)

- ① S.Hamasaki, T.Yakoh, InTech, Decorators Help Teleoperations, Chapter 2, Remote and Telerobotics, 2010 年 5 月, p.17-32.
- ② C.Röesener, T.Deutsch, R.Lang, B. Müller, T.Yakoh, Springer-Verlag, "Emulating the Mind", Engineering & Neuro-Psychoanalysis Forum Book, 2008 年 10 月, p.324-338.

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

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし