

遠隔操作システムにおける遅延動画像のための 低遅延装飾器の実装と評価

Implementation and Evaluation of Decorators
for Delayed Live Streaming Video on Remote Control System

浜崎 真一¹ 矢向 高弘¹

Shinichi Hamasaki¹, Takahiro Yakoh¹

¹慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科

¹Department of System Design Engineering, Keio University, Yokohama, Japan

Abstract: A remote control system is one of the applications of communication. A user at a local side requires feedback information from a remote side to operate. In general, visual information and haptic information are used. However, it is impossible to synchronize local side and remote side perfectly because of communication delay and processing time. When the delay becomes long, the operability of remote control system becomes worse. To overcome this difficulty, this article proposed to introduce visual decorators, which are mainly researched in the field of virtual reality, in remote control system. The proposed decorators superimposed real-time remote side information on delayed remote video playout. A position decorator indicated the position of remote robot, and a force decorator indicated the force of the robot. Experimental results showed two decorators improve the operability of the remote control system over network with delay. These results confirmed the effectiveness of proposed decorators for remote control system with delayed video playout

第1章 序論

インターネットの広帯域化により、ビデオ映像を用いた通信技術が普及しつつある。また、バイラテラル制御技術が触覚通信を可能としてきている。これらの技術を統合することで、視覚、聴覚、触覚を同時に通信するシステムの登場が期待されている。

しかし、視聴覚通信と触覚通信は本質的に異なるものである。円滑な視聴覚通信には広帯域、低ジッタという条件が要求され、200ms 程までなら遅延は許容される。一方で触覚通信においては、通信遅延がフィードバック制御器のサンプリング周期決定に影響を与える。違和感なく触覚を再現するためには少なくとも 800Hz のサンプリング周期が必要であり、約 1ms までしか遅延は許容できない。このように、視聴覚通信と触覚通信ではネットワークに要求するパフォーマンスが大きく異なる。

このような背景から、視聴覚通信には広帯域な通信経路、触覚通信には低遅延の通信経路というように、別々に経路を設計することが考えられるが、この場合、視聴覚情報が触覚情報より後に到着することになり、システム使用時に違和感が生じる。

この問題に対し、本論文では遠隔操作システムの

ための装飾器の提案と評価を行った。装飾器は触覚情報に基づいてビデオ映像に装飾を行う。これにより、動画の遅延がある状態での遠隔操作の操作性向上を図ることができた。

以下に本論文の構成を示す。第2章では背景を述べる。第3章では提案手法を記す。第4章で実験環境を述べ、実験および結果について第5章で記す。第6章で結論を述べる。

第2章 背景

遠隔地での作業を可能にするという点で、遠隔操作技術は注目すべき技術である。一般的に遠隔操作は、遠隔地の映像情報をフィードバックし、遠隔地の状況を確認しながら行われる。片方向通信であることが多いが、バイラテラル(双方向)通信システムによる触覚通信も達成されてきている[1]。

バイラテラル通信システムを遠隔操作システムに組み込むと、遅延によってバイラテラル制御に必要な十分なサンプリング周期を確保できないという問題が発生する。また、ジッタや遅延は操作の安定性に影響を及ぼす。これらの問題に対し、ジッタや遅延自体を減らすため、トランスポート層、ネットワーク層、アプリケーション層に焦点を当てた研究が

行われている[2][3][4]。他に、仮想空間上の捜査対象の位置情報に着目し、Synchronous Collaboration Transport Protocol (SCTP)と呼ばれる、同期に必要な情報に優先度を置く技術が研究されている[5][6]。このように、これまでの研究はシステムの内部から問題を解決する方法をとっている。

一方、装飾器は人とシステムの相関性に着目している[2]。装飾器は、遅延状況や操作対象の位置を表す補助情報をビデオ映像の到着よりも早く描画することで、その時々遅延状況に合わせた操作を操作者に促す。遅延、ジッタの変動を専用カーソルの色の变化で表すもの[2][6]、操作対象の軌跡や未来の予測位置を表示するもの[6]など、その種類は様々である。装飾器は、遅延そのものではなく遅延による影響に言及し、操作者の操作を改善することで操作性を向上させる技術である。

第3章 提案

本章では、提案する装飾器について述べる。一般的に、人の行動決定は視覚情報に強く依存する。そこで本論文では、触覚通信情報の視覚化を提案する。また、本論文では画像通信と触覚通信を別々の経路で行い、後者の遅延が小さい、つまりビデオ映像よりも触覚通信情報が先に到着するような遠隔操作システムを想定しているため、受信時には触覚通信情報がより新しい情報となる。これを基に装飾器を描画し、遅延動画の補助を行うことは妥当であるといえる。

本論文では二つの装飾器を提案する。一つは、遠隔地のロボットのリアルタイムな位置情報を表す位置装飾器、もう一つはロボットのトルクを表す力装飾器である。

位置装飾器は、遠隔地のロボットの位置をCGイメージで描画する。触覚情報と映像情報の通信遅延が等しければ、ビデオ映像内のロボットと装飾イメージの動きが完全に一致する。しかし、今回用いる遠隔操作システムは触覚情報の方が早く通信されるため、ビデオ映像に比べ、装飾イメージはロボットの未来の位置を示すこととなる。視覚通信遅延が大きいほど、位置装飾器の効果も大きくなると期待される。

一方、力装飾器は、目に見えない力情報を視覚化する。様々な方法が考えられるが、本論文ではトルクの大きさを棒グラフで表すというシンプルな方法を用いる。本論文では、この二つの装飾器の効果について評価を行う。

第4章 実験環境

図1に実験環境の全体図を示す。提案した二つの

装飾器を評価するために、触覚通信システムとライブビデオストリーミングシステムを並行してデザインした。

触覚通信システムにおいては、操作者側に入力用の棒（ハンドル）をマスタとして、遠隔地側にはスレーブとして配置し、それぞれモータシャフトに直結させた。両地点の装置に用いられるモータは4chバイラテラル制御器によって制御される[1]。このシステムにより、マスタとスレーブの力および位置情報が双方向に通信される。操作者がマスタを回転させると、遠隔地のスレーブがその動きを追従する。同時に、スレーブが外力を受けると、その力がマスタに返ってくる。モータ、ギア、モータドライバ、PCは操作者側、遠隔地で同じものを用いる。詳細を表1に示す。

表1：触覚通信制御器

Controller	
CPU	Pentium4 Processor 640 3.0Ghz clock 2MB cache
Motherboard	800Mhz FSB
Memory	1Gb
NIC	IntelPRO/100S Desktop Adapter
OS	RTLinux-3.1 Linux Kernel Version 2.4.20

Control device	
Motor and gear head	Torque constant 60.3 mNm/A Reduction ratio 12:1
Motor-drive	Max 110V
Rotary encoder	81,000 pulse
D/A board	Resolution 12bit Conversion time 10 μs
Counter-board	Counter 32bit Maximum input frequency 1Mhz

リアルタイム触覚通信を制御するために、RTLinuxを使用した。また、通信にはRT-Messengerを使用した[7]。RT-Messengerは、パケットをアプリケーション層から物理層に直接送ることで処理遅延を最小化するシステムである。図2にRT-Messengerの構造を示す。

図3に、触覚通信デバイスの位置追従応答を示す。この図から、マスタ（ローカルデバイス）の位置をスレーブ（リモートデバイス）が追従できていることがわかる。

遠隔地の映像情報をフィードバックにはライブストリーミングシステムを用いた。遠隔地から操作者側へUDPで通信し、30BPSのビデオ出力をする。このシステムも処理遅延を最小化するように設計された

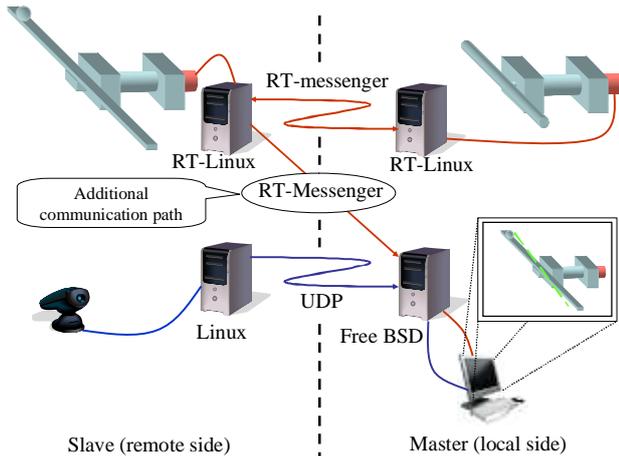


図 1 : 実験環境の全体図

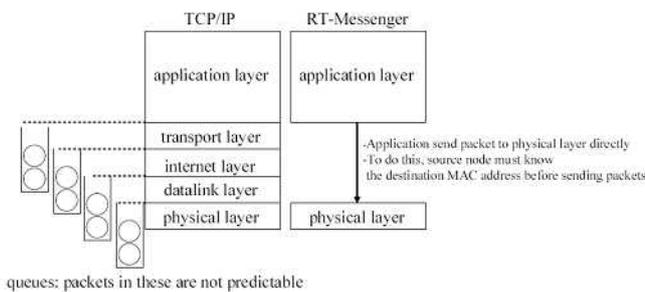


図 2 : RT-Messenger の通信構造

ものである[8]が、120 ~ 480ms の範囲で任意に遅延を制御することができ、ビデオ出力を遅らせることが可能である。

この触覚通信システムとライブストリーミングシステムに合わせ、スレーブのリアルタイム情報を表す装飾器をデザインした。本論文ではスレーブの位置およびトルク情報を採用した。これらは触覚通信情報であるが、装飾器として操作者側モニタに描画するために、触覚通信システムの遠隔地側とライブストリーミングシステムの操作者側をつなぐ追加経路を RT-Messenger を用いて作成した。図 1 に追加経路を示す。装飾器は SDL と OpenGL を用いて描画した。

提案した装飾器のうち、位置装飾器は棒状に描画し、スレーブの位置を追うように回転する。もう一方の力装飾器の描画は、スレーブの右側にかかるトルクに応じて右側の棒グラフが、同様に左側にかかるトルクに応じて左側の棒グラフの大きさが変化する、という方法をとる。図 4 に二つの装飾器を実装した様子を示す。

第 5 章 実験および結果

本論文では、遠隔操作システムの操作性の評価に、タスクの達成時間、操作の安定性の評価にスレーブ

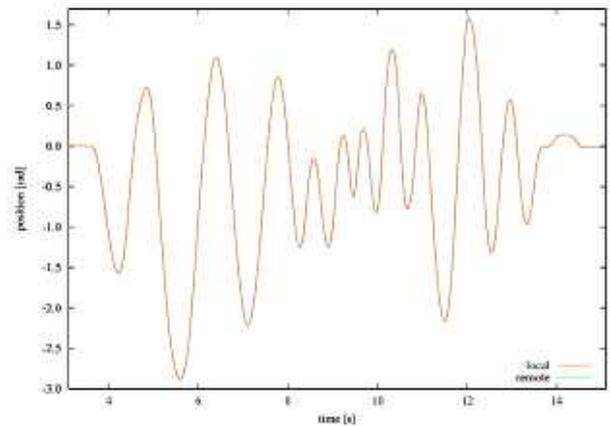


図 3 : マスタ、スレーブ間の位置追従応答

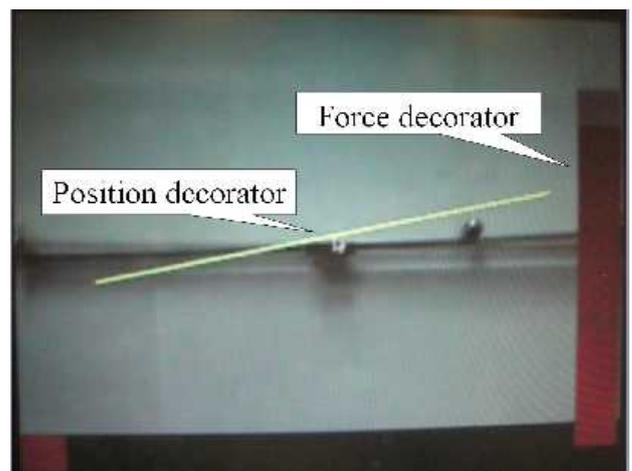


図 4 : 位置装飾器と力装飾器

の力の応答を用いた。

5-1 実験

本論文では、スレーブレール上を自由に転がる金属球の位置をレールの中心に静止させることを目標タスクとする。球をレールの左端に置いた状態からタスクを開始する。球を中心に静止させるまでにかかった時間で操作性を評価し、この時間が短いほど操作性が優れているとした。

また、操作の安定性を評価するために、スレーブにかかる力の応答を測定した。球がレールの中心から離れるほど、スレーブのトルクは大きくなり力の応答も大きくなり、操作が安定しない。反対に球がレールの中心付近にあるときにはトルクは小さくなり、操作が安定しているとした。

レールの長さは 950mm、球の直径は 32mm、球を静止させる範囲はレール中心から ± 40 mm とした。

装飾器の組み合わせとライブストリーミングの映像遅延を環境パラメータとした。位置、力装飾器の両方を用いたとき(P+F)、位置装飾器のみ(P)、力装飾

器のみ(F)、装飾器を用いなかったとき(Non)を設定し、映像遅延を 120、240、360、480ms と設定した。

5人の被験者に、上記の条件を組み合わせた16通りの実験環境で2回タスクを行ってもらい、計10回の測定結果の平均を用いて操作性を評価した。また、10回のうちの代表結果を用いて操作の安定性を評価した。

5-2 タスク達成時間の考察

表2にタスク達成時間の平均結果を示す。

Delay[ms]	Non[s]	P[s]	F[s]	P+F[s]
120	33.90	21.43	27.46	27.71
240	38.75	30.62	35.87	26.40
360	50.00	37.46	41.81	35.03
480	56.62	36.53	50.84	46.00

表2から、ストリーミングビデオ遅延が120msで位置装飾器を使用した時が最も短い時間でタスクを達成し、遅延が480msで装飾器を用いなかった時タスク達成に最も時間がかかったことがわかる。

映像遅延が480msのときは、装飾器の有無にかかわらずタスク達成にかかる時間は大きくなっている。被験者によると、120~360msの遅延環境では徐々に遅延になれて操作しやすくなるが、480msの時から極端に操作がしにくくなるとのことであった。

装飾器はどの遅延環境でも総じて効果的であり、特に位置装飾器はタスク達成時間の短縮に大きく貢献していると考えられる。

位置装飾器は、映像遅延が大きいときにタスク達成時間の短縮の面で効果的に作用した。480msの遅延環境では装飾器を用いなかった場合に比べて20秒短縮できていた。球を静止させるために操作者はスレーブの動きを確認しながらゆっくりとマスタを操作するので、映像遅延が小さいときには映像中のスレーブの位置と位置装飾器によるイメージの位置の差が小さく、装飾器の効果はあまり大きくなかった。

力装飾器は位置装飾器に比べてタスク達成時間をあまり短縮できなかった。力装飾器の目標は、スレーブにかかる力を表すことで球のレール上の位置を推定することであったが、被験者によると、力装飾器による棒グラフの長さの変化は実際のタスクの動きと異なるためにわかりにくいとのことであった。また、力情報の視覚化はあまり有効ではなかったとも考えられる。

二つの装飾器を用いた時は、どの遅延環境でもタスク達成時間を短縮できたが、二つの装飾器の効果を考えて、この結果は位置装飾器の効果によるも

のであり、二つを同時に用いたことによるものではないと思われる。

5-3 操作の安定性の考察

代表結果のスレーブの力の応答を用いて、操作の安定性を考察する。

図5~8は、装飾器の組み合わせごとこの力の応答を示す。

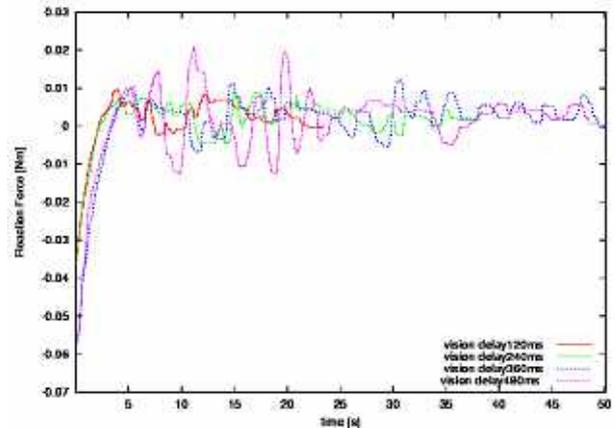


図5：装飾器を用いなかった時の力の応答

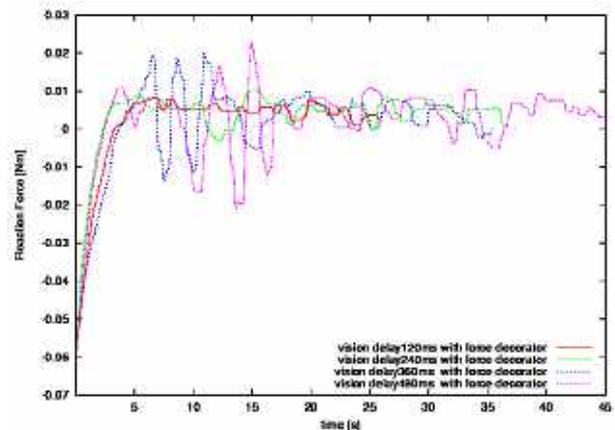


図6：位置装飾器を用いた時の力の応答

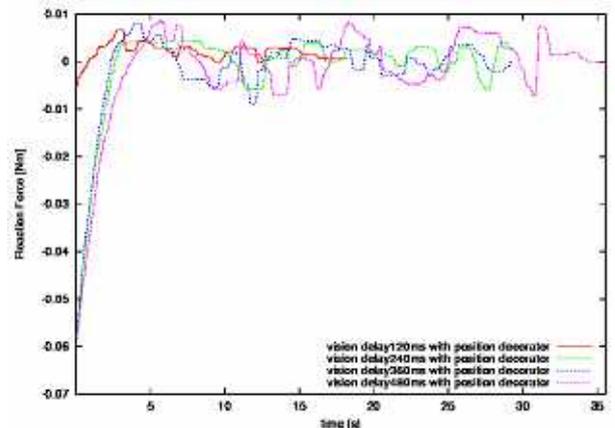


図7：力装飾器を用いた時の力の応答

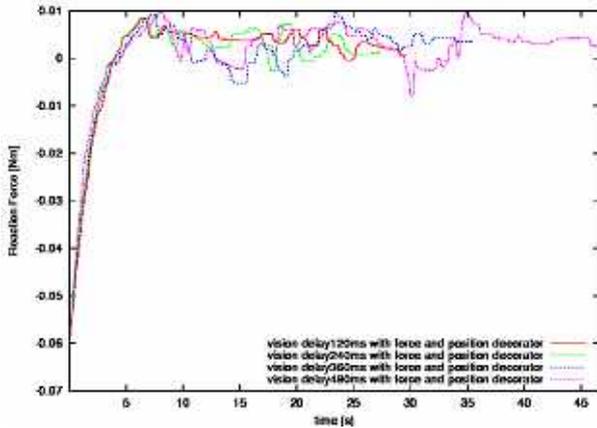


図 8 :二つの装飾器を用いた時の力の応答

映像遅延が大きい条件では、装飾器を用いなかった時にスレーブにかかる力は大きく変動した。これは、球の位置が安定しなかったためにマスタからの操作が大きくなったためである。

映像遅延が大きいとき、力装飾器を用いてもタスク開始から 20 秒ほどはスレーブにかかる力は大きく変動しており、操作の安定化に寄与していない。しかし、徐々に力の変動は小さくなり収束していった。力の変動が大きいときには力装飾器による棒グラフの長さの変動も大きくなり目立つので、その効果が発揮されるようになったためと考えられる。力装飾器は、操作の安定性が大きく失われた時に効果を発揮した。

一方、位置装飾器を用いた時は、映像遅延の大きさに関わらず、力の変動は小さくなり、操作の安定性が向上したことがわかる。

二つの装飾器を同時に使用した時も力の変動は小さく、操作が安定化した。タスク達成時間の場合と同様、位置装飾器による効果が大きかったことが理由と考えられる。

図 9~12 に映像遅延環境ごとの力の応答を示す。

映像遅延が 120ms のときは、装飾器の組み合わせに関わらず、総じて力の変動は小さい。単純に、違和感なく知覚できる範囲の遅延であったためだと考えられる。

映像遅延が小さいときには、力の変動の振幅はすぐに収束していったが、特に位置装飾器を用いた時に顕著であった。低遅延の時には、力装飾器より位置装飾器が効果的であったといえる。遅延が小さく操作が安定しているときは、力装飾器による棒グラフの長さの変動が少なく、その効果はあまり発揮されなかった。

映像遅延が 360ms、480ms と大きい条件では、装飾器を用いなかった場合および力装飾器のみを用いた場合に、操作は安定しなかった。特に 480ms の遅

延ではスレーブにかかる力も大きくなっており、映像情報の遅延が操作性に大きな影響を与えることがわかる。

スレーブにかかる力の左右（図中では正負）に振れる回数に着目すると、位置装飾器を用いるとその数が減少しており、操作の安定化が図られたといえる。

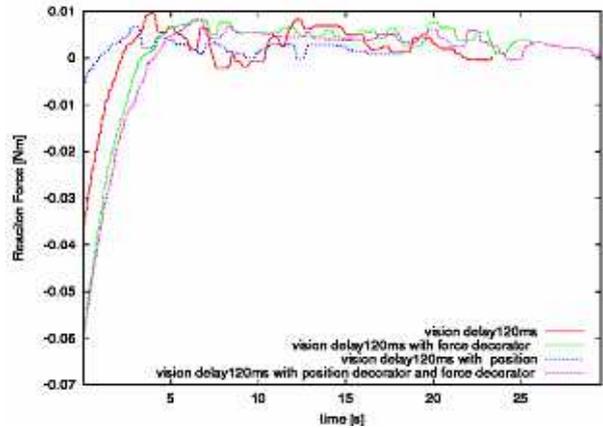


図 9 :映像遅延が 120ms の時の力の応答

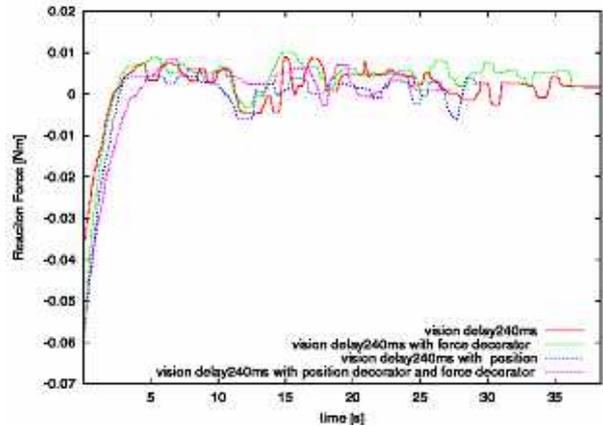


図 10 :映像遅延が 240ms の時の力の応答

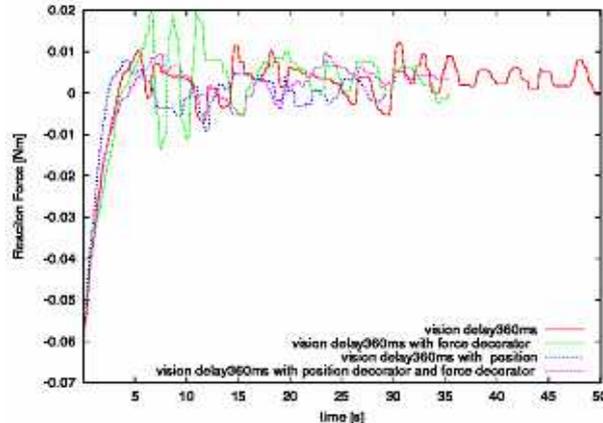


図 11 :映像遅延が 360ms の時の力の応答

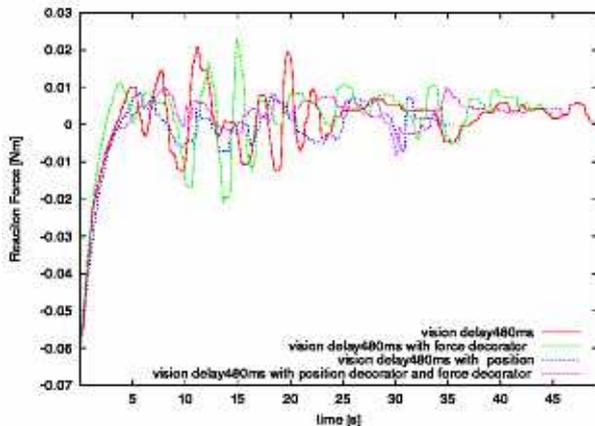


図 12 :映像遅延が 480ms の時の力の応答

第 6 章 結論

本論文では、ネットワーク遅延環境下での遠隔操作システムにおける操作性の改善を目的とした装飾器の提案と評価を行った。装飾器に用いる情報はライブストリーミングの出力映像よりも小さい遅延で通信されるため、装飾器による補助情報は出力映像よりも未来の状態を表すことになる。この未来の状態を表す情報を用いて遠隔操作システムの操作性を向上させることが本論文の意図であった。

実験結果から、映像遅延が大きい時、または操作が大きい時に提案した装飾器は有効であることがわかった。特に位置装飾器は操作性向上に大きく寄与した。位置装飾器による棒状のイメージはがスレーブと同様の動きをするので操作者にとってわかりやすく、一見してスレーブの未来位置がわかるという点で優れていた。一方で力情報を視覚化した力装飾器の効果はあまり小さくなく、また今回のタスクが集中力を要するものであったために力装飾器によって描画された棒グラフの動きに注意することが難しかった。

装飾器は補助情報を描画し、的確な操作を操作者に促すものである。通信遅延やフィードバック遅延を問題として扱う場合、それを克服するためには操作の「素早さ」が重要となってくる。そこで装飾器に求められるのは「一見して理解できる」というわかりやすさである。情報を即座に操作に反映させるには、すぐに認識できるような情報である必要がある。素早い操作を促すには、視覚情報が最も効果的であり、この点から直接スレーブの位置を表した位置装飾器が有効であったと考えられる。

本論文では、リアルタイムな遠隔操作システムにおいて装飾器による情報補助が有効であること、また操作対象の位置情報の補助が特に有効であることを示した。

謝辞

本論文の一部は Grant-in-Aid for Scientific Research (C)(18500138)、(B)(20300079)、JSPS(Japan Society for the Promotion of Science)の助成による。

参考文献：

- [1] W. Iida and K. Ohnishi, "Reproducibility and operability in bilateral tele-operation" Proc. IEEE International Workshop Advanced Motion Control, pp.217-222,2004.
- [2] Gutwin et al., "Revealing Delay in Collaborative Environments" Proc. ACM Computer Human Interaction, pp.503-510,2004.
- [3] S. Shirmohammadi and Nancy Ho Woo, "Shared Object Manipulation with Decorators in Virtual Environments" Proc. IEEE International Symposium on Distributed Simulation Real-Time Applications, pp.230-233,2004
- [4] S. Dodeller and N. D. Georganas, "Transport Layer Protocols for Tele-haptics Update Message" Proc. Bilateral Symposium on Communications,2004
- [5] "IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation and Application Protocols" IEEE 1278-1995
- [6] A. Boukerche, S.Shirmohammadi, and A. Hossain, "Moderating Simulation Lag in Haptic Virtual Environments" Proc. IEEE the 39th Annual Simulation Symposium (ANSS'06),2006
- [7] H. Sato, "A real-time communication mechanism for RTlinux" Proc. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, vol.4, pp.2437-2442,Oct 2000
- [8] K. Endo, K. Yoshida and T. yakoh, "Low Delay Live Streaming System for Interactive Use" Proc. IEEE International Conference on Industrial Informatics 2008, pp.217-222,2008