

基礎論文

マルチラテラル遠隔制御理論に基づくハプティックネットワークゲームの作成と通信遅延がQoEに及ぼす影響の調査

三好 孝典^{*1} 前田 慶博^{*2} 森田 陽介^{*3} 石橋 豊^{*4} 寺嶋 一彦^{*5}

Development of Haptic Network Game Based on Multi-lateral Tele-control Theory
And Influence of Network Delay on QoE

Takanori Miyoshi^{*1}, Yoshihiro Maeda^{*2}, Yosuke Morita^{*3}, Yutaka Ishibashi^{*4}, and Kazuhiko Terashima^{*5}

Abstract – In this paper, the influence which it has on "Quality of Experience"(QoE) in the haptic network game is discussed. First, the control method for the haptic network game, in which a continuous dynamic interaction such as tug of war is realized, is described. Second, the subjective and objective evaluations of QoE are performed through a "Falling guidance game" using the proposed control method. Although QoE's deteriorates according to increase of communication delay is investigated in the five-step evaluation with MOS(Mean Opinion Score), it becomes clear that the degradation of QoE is not worried for a player in the range of domestic communication delay. Moreover, in regression analysis, it is suggested that the improvement of a future haptic network game should be done by a visual sense rather than the viewpoint of haptic sense. The proposed control method is considered that it is an adequate algorithm for practical use of a haptic network game since it can realize a dynamic interaction stably also in the environment of RTT(Round Trip Time)=400 [ms].

Keywords : Haptic feeling, Network delay, Multi-lateral Tele-control, Quality of Experience

1 緒言

触覚は、視覚・聴覚に次いでネットワークによって共有することが期待されている人間の感覚であり、近年、インターネット通信の高速化・安定化に伴い、触覚を用いたネットワークゲームが現実味を帯びている。触覚を用いたネットワークゲームは、人間と対象物との力学的干渉をどのようにプレーヤに知覚させるかによって、1. 振動によって知覚させるもの、2. 瞬間的な衝撃力によって知覚させるもの、3. 持続的な力によって知覚させるもの、の3つに分類できる。1は既に実用化されており、PS4やWiiなどで使用されている[1, 2]。2も従来から研究されており、卓球ゲームをネットワーク化したHaptic Battle Pong[3]や、エアホッケーをゲーム化した著者らの[4]などが報告されている。

これら2つがネットワークゲームの初期段階から

登場したのは、力学的閉ループが生じないために安定性の確保が比較的容易であったためであると考えられる。力学的閉ループとは、力帰還型の遠隔制御において、マスターとスレーブが力を介してお互いの運動を変え合うループ構造である。ネットワークゲームの場合はループ上で通信遅延による位相遅れが発生するため、閉ループは不安定になりやすい。しかしながら、1においては振動による人間の運動変化は極めて小さいため、ほぼ開ループ構造とみなすことができる。2においても力学的閉ループが構成されるのは、衝撃力発生の一瞬だけで、それ以外は開ループ構造となっている。そもそも文献[3]の場合は、最初から通信遅延を含んだ力学的閉ループが成立していない。ボールを遠隔地間でやり取りする行為は衝撃力発生のトリガとなるだけで、あるプレーヤの反力が遠隔地のプレーヤの運動を変化させるわけではない。すなわち、力学的干渉は目の前のPCと操作しているデバイス間だけで行われている。

しかしながら、上述の2タイプだけではネットワークを介した綱引きゲームなど、持続的に押し引きしたりする臨場感溢れるゲームは実現できない。これらの実現には3のタイプが必要となるが、力学的インタラクションが遠隔地のプレーヤ間で持続的に生じる

^{*1}豊橋技術科学大学

^{*2}名古屋工業大学

^{*3}村田製作所

^{*4}名古屋工業大学

^{*5}豊橋技術科学大学

^{*1}Toyohashi Univ. of Tech.

^{*2}Nagoya Inst. of Tech.

^{*3}Murata Manufacturing Co., Ltd.

^{*4}Nagoya Inst. of Tech.

^{*5}Toyohashi Univ. of Tech.

ため、閉ループの安定化が課題となる。当該タイプのゲームの例として、大西洋を越えた協調作業を実現した Transatlantic Touch[5] や、お互いに協力しながら仮想空間内で球体のオブジェクトを運ぶ Networked Haptic Basketball Game[6]、コミュニケーションをとりながら迷路を移動する Networked Haptic Collaboration Maze Game などが報告されている [7]。また、著者らも [8, 9] において、お互いが力を知覚しながら対象物を運ぶ実験を行っている。これらの先行研究によって、通信遅延の増加がゲームの操作性を悪化させることが明らかとなっているが、安定性の問題からゲームが実施可能な往復通信遅延 RTT(Round Trip Time) は最大でも 90[ms] に留まっている。著者らの実験では、豊橋技術科学大学を基点として国内の様々な高専との有線接続における RTT は、ネットワークに負荷のかかっていない状態で 8[ms]-36[ms]、負荷のかかるネットワークゲーム中においては 36-134[ms] 程度であることが確認されている [10] (マルチレートサンプリングのデシメーションによる遅延を除く)。さらに国際間のネットワークゲームにおいては米・ニューヨーク市立大学と 191[ms]、ドイツ・シュツツガルト大学と 323[ms][11]、米・フロリダ大学との間で 221[ms][12] の RTT が観測されているため、力覚を用いたネットワークゲームの国際的な普及のためには、400[ms] 程度の RTT においても安定した制御を実現した上で、通信遅延がゲームの操作性に及ぼす影響を軽減することが重要である。

一方、プレーヤの数でハプティックネットワークゲームの分類を行うと、プレーヤが 1 対 1 の場合と 3 人以上でプレイする場合とに分けられる。前者はバイラテラル遠隔制御によって、後者はマルチラテラル遠隔制御によって力学的閉ループを安定化させることになる。ネットワークゲームの醍醐味は遠隔地に存在する様々なプレーヤとのコミュニケーションであるから、1 対 1 だけでは不十分で、マルチラテラル遠隔制御がキーテクノロジーとなる。マルチラテラル遠隔制御によって力学的インタラクションを安定化する方法としては、Yashiro らによる多変数ナイキスト安定定理を用いたセントライズド制御 [13] や Kanno らによるウェーブノードを用いた制御手法 [14]、Lee らによる Multiple Cooperative Robots[15] や Mendez らによる N-port multilateral system [16] が提案されているが、いずれも理論や実験室内での実験に留まっており、大陸を超えるほどの通信遅延の条件下で実験されているわけではない。さらに、用途はロボットを用いたマスター・スレーブシステムを想定している。著者の知る限り、著者のグループ以外で 3 のタイプにおける 3 人以上のハプティックネットワークゲームの例は報告さ

れていない。

著者らは近年、文献 [11, 12] において、国際間で 3 のタイプのハプティックネットワークゲームが 3 人のプレーヤで可能であること、文献 [10] において国内の各高専をインターネットで結んで 4 人対 4 人の仮想綱引きゲームが実現可能であることを実証した。また、当該ゲームにおいて公衆無線回線 LTE が RTT=70[ms] 程度で利用できることも確認した。ただ、これらの報告はハプティックネットワークゲームが安定して実現できること、言わば制御工学の視点で報告されており、コンテンツがどのようなものであったか、また通信遅延によってどのように操作性が変化してゲーム性が失われていくか等、ユーザサイドの視点で考察されたものではなかった。

そこで本論文ではネットワークエミュレータで人為的に通信遅延を付加した状態で 3 のタイプのハプティックネットワークゲームを行い、通信遅延の増加により QoE(Quality of Experience ユーザ体感品質)[17] がどのように変化していくのかを主観評価と客観評価の双方を用いて確認する。主観評価は、ITU-R BT 500-12 により推奨されている単一刺激法 [18] を用いて MOS(Mean Opinion Score 平均オピニオン評点) による 5 段階評価によって評価し、客観評価はゲームにおける操作力や、得点、初得点までの時間によって評価する。被験者 22 人によって実験を行い、本ゲームにおいて通信遅延の増加に伴い QoE が劣化するのか、それはハプティックネットワークゲームの実用化にどの程度の支障となるものであるか、を確認する。さらに、実用化への改善の方向性を探るとともに、劣化をもたらす要因について力学的な面から考察を与える。

本論文は 2 章で実験システムのハードウェア構成について、3 章でゲームのコンテンツと QoE の評価方法について述べ、4 章で評価実験の結果とその要因について考察し、5 章で結言とする。

2 実験システムの構成

2.1 力覚提示デバイス

本実験で用いるプレーヤの力覚提示デバイスは、図 1(a) で示されたりニアモータ (LM1247-120-01 Faulhaber 社製) による位置決め装置に、操作力を検知できる力センサ (WCEX-OR2AS ワコー社製) が装着されたものである。プレーヤはこのデバイスの力センサをつまんでセンサに操作力 f_{hi} [N] を与えると共に、デバイスの位置 x_{hi} [m] を触知覚することができる。ここで位相補償フィルタ (後述) の逆関数を $1/G_c(s)$ 、デバイスとプレーヤの手の間の剛性を K_{hi} [N/m]、デバイスとプレーヤの手の間のダンパ係数を D_{hi} [N/(m/s)] とすると、クライアントのブロック図と伝達関数は、

図1(b)と(1)式で与えられる。ここで x_{ri} [m] はプレイヤーの手の位置である。本ブロックではプレイヤーが直接操作力 f_{hi} を加えるという考え方ではなく、プレイヤーの手の位置 x_{ri} とデバイスの位置 x_{hi} の差分がプレイヤーのインピーダンスを通じて操作力 f_{hi} を発生させ、それをセンサが検知するという考え方を取っている。パラメータ $b, W_m(s)$ は設計パラメータである。なお、ここで下付きの i はそれぞれのプレイヤーの番号を表し、 n 人が操作を行うならば $i = 1, 2, \dots, n$ の値をとる。

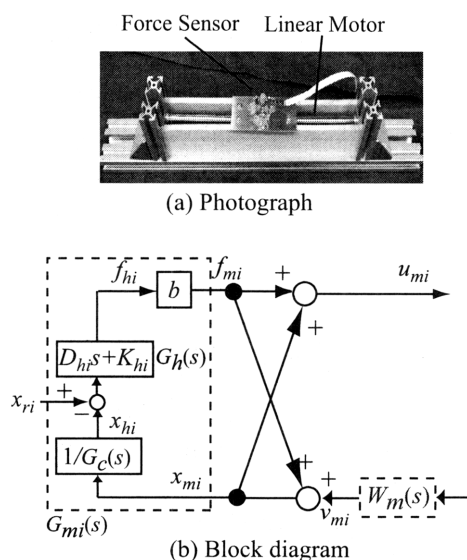


図1 力覚提示デバイスの写真と制御ブロック
Fig. 1 Photograph and block diagram of haptic device

$$F_{mi}(s) = -b \frac{D_{hi}s + K_{hi}}{G_c(s)} X_{mi}(s) \quad (1)$$

通常、ハプティックネットワークゲームに使われるデバイスは PHANTOM[19] や Falcon[20] などのインピーダンス型のデバイスで、プレイヤーが操作位置を入力し、それに対応した反力をデバイスが発生するものである。しかしながら本システムの構成は、プレイヤーが間接的に操作力を入力して物理エンジン（後述）の決定した位置にデバイスが位置決めを行うアドミタンス型の構造となっている。この理由は、多数のプレイヤーがハプティックネットワークゲームを行うとき、常にデバイスを保持しているとは限らず、他のプレイヤーの操作で自身のデバイスがフリーの状態動くことが起こり得る。このときインピーダンス型のデバイスでは運動の制約が行えず、思いもよらない運動につながり危険なためである。対して位置決めデバイスであれば、位置の制約・速度の制約をデバイス側で設定することができる。上記理由から、手で把持することを前提としているインピーダンス型のデバイスは大規模多人数参加型オンラインゲーム (MMOG) には適切ではないと考えている。

本システムの基本的な制御構成は、Anderson[21] や Niemeyer[22] などによって従来提案されたウェーブフィルタ構造に、著者が提案する安定性をより増加させるための位相制御フィルタ $W_m(s)$ や位相補償フィルタ $1/G_c(s)$ [12, 23] を追加したものである。従来の構成は3章において、比較実験の対象として用いる。

2.2 ネットワーク構成

本論文においてネットワーク構成は図2のトポロジーとしている。すなわち、世界中に存在する n 個の力覚提示デバイスがネットワークごとに異なる通信遅延 T_{ui}, T_{di} と2つのウェーブフィルタを通じて物理エンジンに接続されている。また、図2の信号 $u_{mi}, v_{mi} (i=1, 2, \dots, n)$ の左側（デバイス側）が図1に詳述されているという位置関係である。物理エンジンはゲームの物理運動を演算する部分で、次節に示すような多重連成モデルで与えられる。

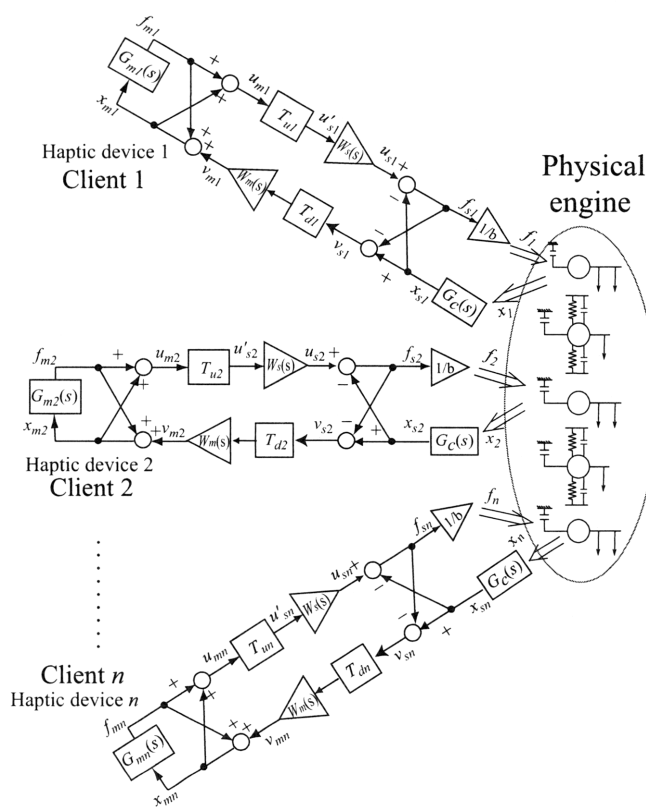


図2 マルチラテラル遠隔制御による力覚共有システムのブロック図

Fig. 2 Block diagram of shared haptic system with multilateral tele-control

力覚提示デバイス $i (i=1, 2, \dots, n)$ から送信される操作力 f_{mi} と、ネットワーク経由後物理エンジンに到達する f_{si} は定常状態で一致する。また、物理エンジンの出力する位置 x_{si} と力覚提示デバイス i が受け取る位置情報 x_{mi} も定常状態において一致する。このことから、クライアントはあたかも多重連成モデルに対し直接力を与え、またその運動を直接触知して

いるように感じ取ることができる。図2においては、 $W_m(s)$, $W_s(s)$, $G_c(s)$ が、我々のアルゴリズムの特徴となる位相制御フィルタと位相補償フィルタであるが、その機能と設計方法は文献[12, 23]を参考にされたい。また、本論文では $n=3$ で実験を行っているが、文献[10]では $n=8$ の実験で、シミュレーションでは $n=2000$ でも安定であることを確認している。

2.3 物理エンジン内のバネ・マス・ダンパ多重連成モデル

物理エンジン内で構築される多重連成モデルを図3に示す。図2の f_i, x_i の右側（物理エンジン部分）が本節で詳述される部分である。

質量 m, m_b [kg]を持つ質点 O_j ($j=1,2,\dots,5$)が、バネ定数 k_b [N/m]、粘性係数 d [N/(m/s)]のバネ・ダンパにより最大で5個直列に接続される。また各々の質点は背景と粘性摩擦 c, c_b [N/(m/s)]で結合されている。質点 O_1, O_3, O_5 は、インターネットを経由してプレイヤーから力 f_i [N]を加えられ($i=1,2,3$)、3人のバネ・ダンパを介した操作力の干渉の結果として、それぞれの質点の位置 x_i [m]が決定される。プレイヤーが力覚デバイスにより直接触覚できるのは O_1, O_3, O_5 の位置 x_1, x_2, x_3 であるが、ゲーム画面には O_j 全ての質点の位置が表示される。

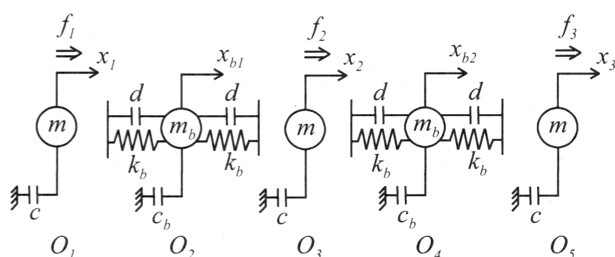


図3 バネ・マス・ダンパ多重連成モデル

Fig. 3 Coupled physical model with spring, mass, and damper

O_j は常にバネ・ダンパによって連成しているわけではなく、3.1節に示されるようにゲームの状況に応じて結合・分離を繰り返す。安定条件が最も厳しくなるのがすべて結合した場合であり、そのときの多重連成モデルの状態方程式は(2)式で与えられる。

なお、本論文では以下のパラメータを用いた。ここで c_b は十分に小さく、 O_2, O_4 はほぼ自由運動に近い状態で運動する。また k_b は後述の図9で示されるように、物体の衝突を知覚させるのに十分な硬さである。

表1 実験パラメータ

Table 1 Experimental parameters

	unit	value		unit	value
d	[N/(m/s)]	1	k_b	[N/m]	200
m	[kg]	0.773	m_b	[kg]	0.333
c	[N/(m/s)]	1.582	c_b	[N/(m/s)]	0.1
b		25	c_c		2.0
$W_s(s)$		$\frac{1}{(0.04s+1)^2}$	$G_c(s)$		$\frac{s+c_c}{0.005s+1}$
$W_m(s)$		1			

3 ゲームのコンテンツと評価方法

3.1 評価実験に用いるゲームのコンテンツ

QoEの評価実験は「落下誘導ゲーム」によって実施される。操作の状況を図4に、画面に表示される映像を図5に示す。ただし、図中の矢印は運動を表現するために記述したもので、実際の画面ではバーのみの表示である。左から交互に並ぶ縦バー・横バーが、順に質

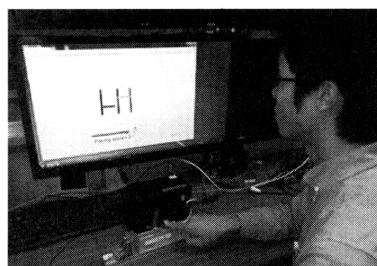


図4 ハプティックネットワークゲームの操作状況

Fig. 4 Demonstration of haptic network game

点 O_1, O_2, \dots, O_5 に対応する。プレイヤーが O_1, O_3, O_5 の縦バーに力センサを通じて操作力を加えると、物理演算によって縦バーが水平移動する。横バー O_2, O_4 は、縦バーからのインタラクションを受けて横方向に移動すると共に、上方から自然落下する運動も付与されている。横バーの初期位置は乱数で決められるためにプレイヤーが予測する事はできない。プレイヤーは縦バーを操りながら落下してくる横バーを適切に誘導して、最下部の移動するゴールエリア内に落下させることで得点を得る。ゴールエリアから少しでもはみ出れば得点にならない。また、得点に応じてゴールエリアの幅は狭くなるため、徐々にゲームの難易度は上がっていく。誘導の方法は様々で、横バーを2つの縦バーで完全に挟みこんでゴールエリアの上方に移動させる方法(HOLD)や、ラケットのように縦バーが横バーを弾きながらゴールさせる(HIT)こともできる。前者は緒言における3のタイプであり、後者は2のタイプに相当する。

操作と画面進行の一例を図5の左側のストーリーで説明すると、初期状態から、上方から落下する O_2, O_4 を

$$x = Ax + Bu = \begin{pmatrix} -\frac{1}{m}D & -\frac{1}{m}K \\ I & 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \frac{1}{m}L^T \\ 0 \end{pmatrix} u, \quad y = Cx = \begin{pmatrix} 0 & L \end{pmatrix} x \quad (2)$$

$$D = \begin{pmatrix} d+c & -d & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m}{m_b}d & \frac{m}{m_b}(2d+c) & -\frac{m}{m_b}d & 0 & 0 \\ 0 & -d & 2d+c & -d & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m}{m_b}d & \frac{m}{m_b}(2d+c) & -\frac{m}{m_b}d \\ 0 & 0 & 0 & -d & d+c \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} k & -k & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m}{m_b}k & \frac{m}{m_b}2k & -\frac{m}{m_b}k & 0 & 0 \\ 0 & -k & 2k & -k & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{m}{m_b}k & \frac{m}{m_b}2k & -\frac{m}{m_b}k \\ 0 & 0 & 0 & -k & k \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$x = (x_1 \ x_{b1} \ x_2 \ x_{b2} \ x_3 \ x_1 \ x_{b1} \ x_2 \ x_{b2} \ x_3)^T$$

$$u = (f_1 \ f_2 \ f_3)^T, \quad y = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$$

避けるために O_3, O_5 を右に移動させる。次いでHOLD-2では O_2, O_4 を挟みこみ、HOLD-3でホールドしながら全体を左に移動させ、HOLD-4でリリースしてゴールの上に落下させる。別の戦略としては右側のストーリーのように、HIT-3で O_2 をヒットして O_1 に反射させ、得点を得ることもできる。

本ゲームのコンセプトは「3人のプレーヤが協力して得点を得ること」であり、プレーヤ同士の競争ではない。例えばHIT-3では、 O_1 の位置を O_3 のヒットの強さに合わせて適切な位置に移動しなければ、ゴール上に O_2 を反射できない。またHOLD-3においても、3人のプレーヤ同士が力覚デバイスにより相手の力を認識しながら、お互いの力を調節して横バーを適切な位置に誘導しなければならない。

なお、双方向でやり取りできる情報は力覚だけで、画面は物理エンジンが演算したバーの位置をプレーヤに表示するだけである。音声や文字情報などのコミュニケーションはない。

初期状態において各質点は離れており、各々の力学的インタラクションが無い状態で独立に物理演算が施される。縦バーと横バーの接触状況に応じて刻々と物理演算式は変化し、全てが接触した状態での状態方程式が(2)式である。どのような接触状態であろうと、受動性からシステムの安定性は保持されている。

3.2 主観評価方法

主観評価方法としては、ITU-R BT 500-12により推奨されている単一刺激法[18]に従い、表2の5段階妨害尺度(5点:劣化が分からない, 4点:劣化が分かるが気にならない, 3点:劣化が気になるが邪魔にならない, 2点:劣化が邪魔になる, 1点:劣化が非常

に邪魔になる)を用いる。そして、すべての被験者の評点を平均してMOS(Mean Opinion Score 平均オピニオン評点)を求める。妨害尺度は基準となる刺激からの劣化度合を評価するもので、本実験では基準となる刺激は後述の Proposed method において RTT が 0[ms] の場合とし、そのときの評点を5とする。

被験者が評価する項目は、以下の3つである。

- 操作性 (力覚提示デバイスが操作しやすいか)
- インタラクティブ性 (手の動きと画面表示が一致しているか)
- 総合品質 (操作性とインタラクティブ性評価の加重和)

総合品質は、被験者が操作性評価とインタラクティブ性評価の双方を勘案して決定するが、加重比率は被験者自身が意識するものではない。4.2節の解析の段階で、結果としてどのような比率で被験者が勘案していたかが考察される。

表2 5段階妨害尺度
Table 2 Five-grade impairment scale

Score	Impairment Scale
5	Imperceptible
4	Perceptible, but not annoying
3	Slightly annoying
2	Annoying
1	Very annoying

3.3 実験条件

本実験において被験者が操作するものは、図5における中央の縦バー O_3 である。それ以外の縦バーはRTT=0[ms]の非被験者が操作する。被験者の力覚提

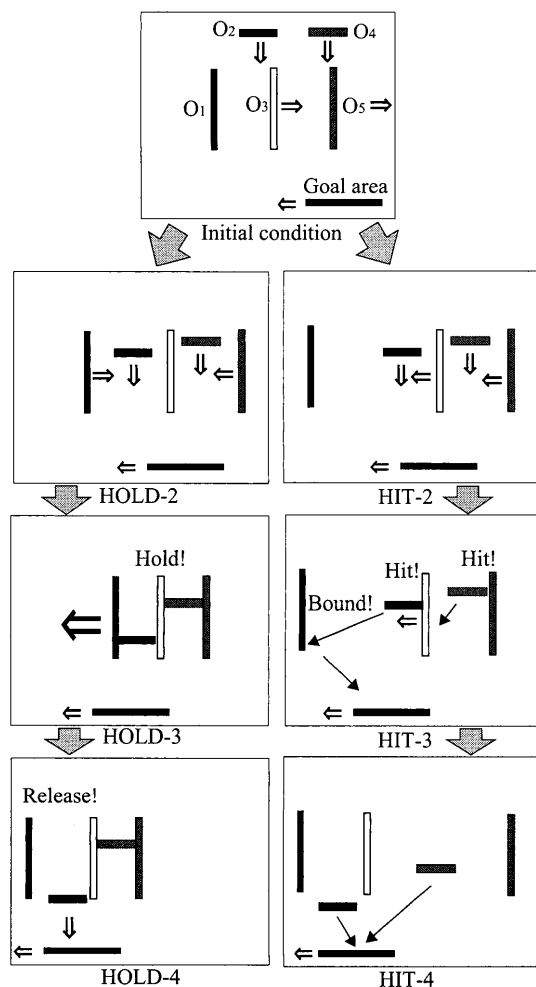


図5 ハプティックネットワークゲームの画面進行
Fig. 5 Sequential diagram of haptic network game

示デバイスとは図2の T_{u2}, T_{d2} を調節できるようにネットワークエミュレータを介して物理エンジンに接続されており、被験者は表3のパターンに基づいて、知らされること無く実験毎に異なったRTTが与えられる。被験者は図5の画面を見ながらゲームを行うが、この画面もネットワークエミュレータを介しているため、同一のRTTが与えられている。

また、本研究で提案している位相制御フィルタと位相補償フィルタ (Proposed method) が有用に機能していることを確認するために、これらを除外した従来のウェーブフィルタ構造 (Conventional method)[22]の制御手法と比較することも行う。表3のControl methodがその分類に該当する。

実験の手順は以下のとおりである。

1. 被験者はProposed methodにおいてRTT=0[ms]の状態を体験し、この状態を基準(評点5)とする。
2. 表3の中から実験パターンがランダムに選択された状態(ただし二度は選択されない)でゲームを実施する。ゲームは90[s]で終了とする。

表3 制御手法とRTTに関する実験条件のパターン

Table 3 Experimental pattern for control method and RTT

Pattern num.	Control method	RTT [ms]
1	Proposed	0
2	Proposed	10
3	Proposed	20
4	Proposed	30
5	Proposed	40
6	Proposed	50
7	Proposed	100
8	Proposed	150
9	Proposed	200
10	Proposed	400
11	Conventional	0
12	Conventional	10
13	Conventional	20
14	Conventional	25

3. ゲーム終了後、被験者は前述の3つの評価項目を表2のグレードで採点する。
4. 2~3を表3の14パターン全てが実施されるまで繰り返す。一人当たりおおよそ40分程度の実験時間となる。なお、基準の状態(通信遅延0msの状態)を忘れた場合は、被験者の申請によって基準の再提示を行う。

実験は22人の健康な成人によって実施された。また、豊橋技術科学大学の「ヒトを対象とする研究規定」に基づき、あらかじめ安全衛生委員会の承認を得た上で実施された。

4 評価実験の結果と考察

4.1 評価実験の結果

RTTの増加によって、どのように主観評価結果が変化したかを図6に示す。また、図7に客観評価結果として(a)にゲーム時間内に取得できた点数を、(b)にゲームにおける初得点取得までに要した時間を示す。なお、両図ともエラーバーは95%の信頼区間を表す。

図6において黒塗りの記号が提案手法、白抜き記号が従来手法を表す。これを見ると、提案手法が従来手法かによって2つのグループに明確に分離できる(従来手法のインタラクティブ性のみ高得点)。また、提案手法・従来手法に関わらず、RTTの増加と共に操作性、インタラクティブ性、総合品質ともに劣化していくことが確認できる。特に、従来手法はRTT=0[ms]の状態においても提案手法に比して大きく劣化しており、操作性(点線)の評点が2.0を切るRTT=25[ms]では「劣化が邪魔になって」ゲームに支障が生じると判断できる。一方、提案手法の総合品質(実線)に着目すると、RTTが0~130[ms]までは評点が3.7

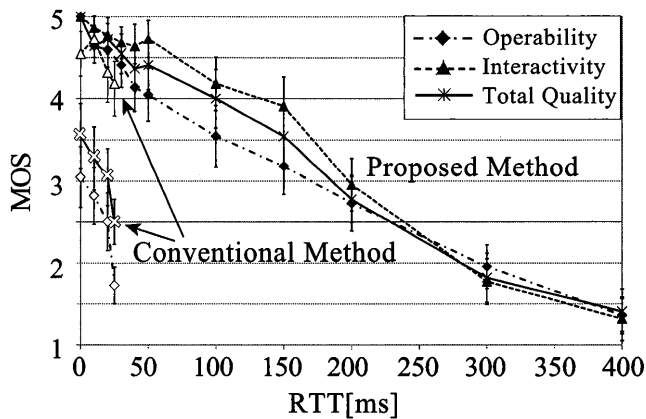


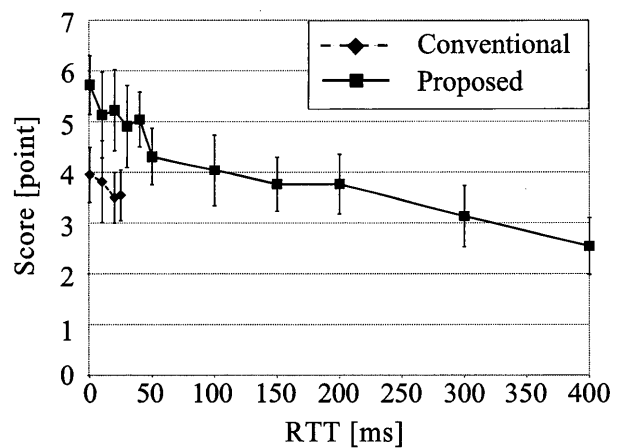
図6 QoEに対する主観評価実験の結果
Fig.6 Experimental results of subjective evaluation for QoE

以上となっており、「劣化が分からないか、劣化が分かっても気にならない」状態であることが確認できる。緒言で述べたように、著者らの調査によれば、豊橋技術科学大学を基点とした全国各地の高専間の有線通信におけるRTTの平均は36-134[ms]で、無線公衆回線LTEを使用しても70[ms]程度であることから、提案の制御手法を用いれば、国内において本ゲームを実施する際の通信遅延の影響は主観的には問題にならないことが確認できた。

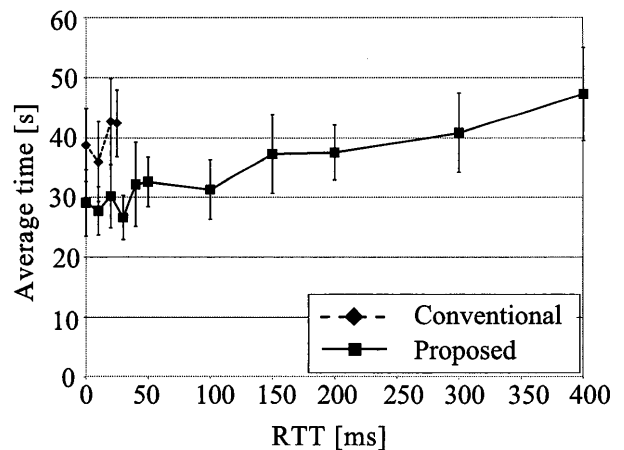
インタラクティブ性の評価に着目すると、提案手法・従来手法ともに良好な結果を得ている。提案手法では、RTT=150[ms]までは4.0以上、従来手法においてもRTT=25[ms]までではあるが4.0以上である。これは操作画面に対しても通信遅延が施されているため、操作と画面の因果関係において違和感を感じにくいためと考察される。

図7(a)を見ると、RTTの増加によりゲームの平均得点が減少していくことが確認できる。また、提案手法の250[ms]の得点と従来手法の25[ms]の得点は、近い値であることが確認できる。ここで今一度図6における従来手法のRTT=25[ms]および提案手法の250[ms]の総合品質の値を見ると、両者とも約2.5であることから、従来手法のRTT=25[ms]に相当するゲームの品質を、提案手法ではRTT=250[ms]まで確保できていると判定できる。先に述べたように、国内でRTT=25[ms]を実現する環境は現在でも多くはないが、RTT=250[ms]であれば、公衆無線回線を含んだ国内ほぼ全ての場所で実現可能である。

客観評価である図7(b)では、RTTの増加によってゲーム開始から初得点獲得までの時間が増加していることが確認でき、(a)の得点の推移と合わせると、ゲームの難易度が確実に増加していると判断できる。従来手法は提案手法よりも時間を要していることから、こ



(a) Game Score



(b) Time until first score

図7 QoEに対する客観評価実験の結果
Fig.7 Experimental results of objective evaluation for QoE

こでも従来手法が適切な制御手法ではないことが確認できる。

注目すべきは提案手法のRTT=0→50[ms]における主観評価値(総合品質)と客観評価値(得点, 初得点までの時間)のトレンドの違いである。主観評価値は5.0→4.4と「劣化が気にならない」レベルに留まっているが、得点は5.8→4.3と1.5ポイントも減少している。すなわち、プレーヤにとって劣化に違和感を感じることなく、ゲームの得点が減少していくことを示している。このことから、QoEの評価は主観評価だけでは不十分で、客観評価も必須であると判断できる。

4.2 回帰分析に基づくQoE改善の方向性

図6の結果から、総合品質のMOS(Mean Opinion Score)と操作性のMOS・インタラクティブ性のMOSがどのような関係にあるのか回帰分析を行った。これにより、被験者らがどのような重みで総合品質を決定したのかを明らかにすることができる。表4において C_{MOS} は総合品質のMOSの推定値、 O_{MOS} は操作性のMOS(実測値)、 I_{MOS} はインタラクティブ性の

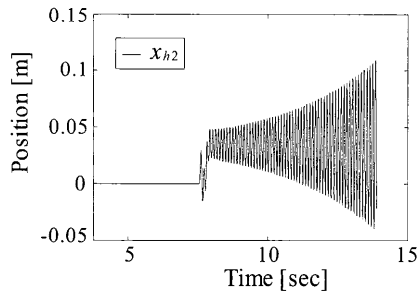


図8 通信遅延による発振 (従来手法)
Fig.8 Excitation of vibration due to RTT
(Conventional method)

MOS (実測値)である。これらの回帰曲線の導出における自由度調整済み決定係数は双方とも 0.999 とほぼ 1 であり、回帰曲線の信頼度が極めて高いことを示した [24]。提案手法では操作性とインタラクティブ性の

表4 操作性とインタラクティブ性に関する総合品質の回帰式

Table 4 Regressive Curve of Total quality with respect to Operability and Interactivity

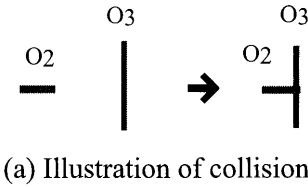
	Estimated equation
Proposed	$C_{MOS} = 0.419O_{MOS} + 0.575I_{MOS}$
Conventional	$C_{MOS} = 0.676O_{MOS} + 0.311I_{MOS}$

重みは 4:6 であるが、従来手法では 7:3 と逆転している。このことは、提案手法においては力覚に密接に関係する操作性はあまり気にならず、視覚が関係するインタラクティブ性の方が総合品質に影響を与えていると解釈できる。図6を見ると、MOSの低い操作性の改善が総合品質の改善につながるように見受けられるが、実際は被験者はそこに重きを置いていない。すなわち、本システムの今後の改善の方向性は、力覚系の性能を向上させるよりも、むしろ画面上の応答など視覚に関わる要素を改善すべきであるとの示唆を得た。

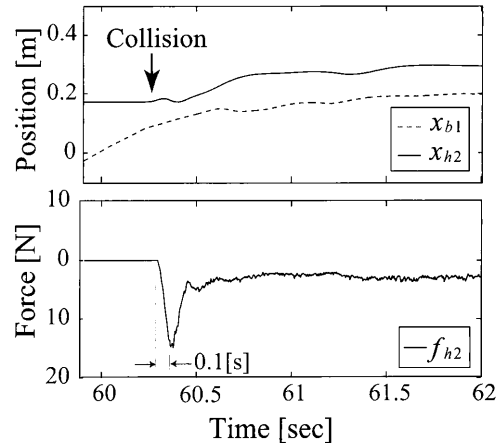
それに対して、従来手法では総合品質の劣化は操作性の悪さに大きく依存している。これは従来手法の不安定性に由来するもので、RTT=40[ms]の遅延を与えるだけで図8のようにデバイスが大きく発振してしまい、25[ms]以下の遅延においても振動的な挙動を示す。従来手法の実験を RTT=25[ms] までしか行わなかったのは、そのためである。

一方、提案手法では RTT=400[ms] においても「劣化が邪魔になる」状態ではあるが、安定してゲームをプレイし続けることができた。図9は RTT=200[ms] のときの、縦バー O_3 に横バー O_2 を衝突させたときの力覚デバイス O_3 の位置 x_{h2} と O_2 の位置 x_{b1} 、および力覚デバイスに取り付けられた力センサが検出した f_{h2} 、すなわち被験者が感じる衝突の力覚である。 O_2

が O_3 に接近し、60.3[s]で衝突が起きる (O_2 の長さ分オフセットされている)が、その瞬間、被験者は0.1[s]の立ち上がりで衝撃感を感じていることが読み取れる。また、その後も安定した力覚を保持している。このグラフからも操作性が良好であることが推測できる。



(a) Illustration of collision



(b) Impact force excited by collision

図9 通信遅延下における衝撃力 (提案手法)

Fig.9 Impact force due to collision under communication latency (Proposed method)

4.3 QoEの劣化要因に関する力学的考察

4.1節により通信遅延の増加に伴いQoEが劣化することは明らかになったが、それが何によってもたらされるかを考察する。

本システムの特徴として、通信遅延の増加につれて粘性抵抗が増加するという性質がある。簡単のために縦バー O_1 に力学的干渉がない状態を考え、(2)式から O_1 に関わる部分だけを抜き出すと、一定の操作力 f_{h1} を加え続けたときの定常速度 v_{h1} は、(3)式で与えられることが分かっている [23]。ここで $e_s = \int_0^\infty (1 - w_s(t)) dt$ ($w_s(t)$ は $W_s(s)$ のステップ応答)である。これを粘性抵抗 $\frac{f_{h1}}{v_{h1}}$ と RTT[s] の関係式に書き直すと(4)式を得、 $RTT = T_{ui} + T_{di}$ に応じて粘性抵抗が増加していくことが分かる。したがって、プレーヤはこの粘性抵抗の増加によって「動かしにくい」、「操作性が悪い」と感じる事が予想される。

$$v_{h1} = \frac{2b}{2cb + c_c(T_{u1} + T_{d1}) + c_c e_s} f_{h1} \quad (3)$$

$$\frac{f_{h1}}{v_{h1}} = c + \frac{c_c e_s}{2b} + \frac{c_c}{2b} RTT \quad (4)$$

このことはRTTと平均操作力の関係を示した図10からも確認できる。縦軸はゲーム中に観測された操作力の絶対値の平均値であり、提案手法（太実線）の傾向としてRTTの増加に伴って操作力が増加していることが認められる。さらに、表1の値を(4)式に代入することによって導出した、一定速度 $v_{h1} = 0.5$ [m/s]の運動に必要な操作力の理論値を図の細線として示す。太実線の平均操作力には横バーとの衝突や他の縦バーとの押し合いも含まれているため細線と同一の値とはなっていないが、平均操作力の増加の傾向は一致する。

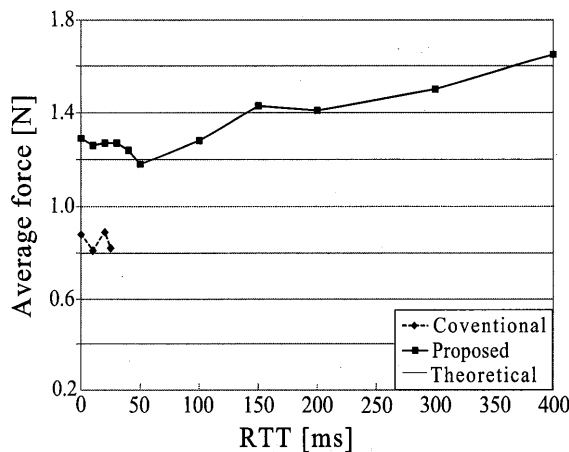


図10 平均操作力とRTTの関係

Fig. 10 Average force according to RTT

操作力の増加がQoEにどの程度関与しているかを分析するために、表5(a)に平均の操作力 F_{avr} を説明変数とした場合の、操作性 O_{MOS} 、インタラクティブ性 I_{MOS} 、総合品質 C_{MOS} のMOSに関する回帰曲線を、同表(b)にはRTT[ms]を説明変数として同MOSを目的変数とした場合の回帰曲線を示す。ここでCont. rateは自由度調整済み決定係数で、1に近いほど回帰曲線に良く当てはまることを示す。

表5 評価実験に基づく回帰式

Table 5 Regressive curve from evaluation experiment

(a) Explanatory variable : Avarage force	
Estimated equation	Cont. rate
$O_{MOS} = -7.615F_{avr} + 13.841$	0.786
$I_{MOS} = -8.744F_{avr} + 15.654$	0.855
$C_{MOS} = -8.148F_{avr} + 10.034$	0.833
(b) Explanatory variable : Round Trip Time	
Estimated equation	Cont. rate
$O_{MOS} = -0.009RTT + 4.637$	0.972
$I_{MOS} = -0.010RTT + 5.044$	0.978
$C_{MOS} = -0.009RTT + 4.836$	0.981

表5の(a)を見ると、操作力の増大とQoEの関係

は比較的良好な当てはまりで線形関数を構成しており、操作力がQoEの劣化に関わっていることが明らかとなった。ただし、自由度調整済み決定係数を(a),(b)と比較すると、操作力の平均値よりも通信遅延の方が回帰曲線に良く当てはまることから、通信遅延そのものに関係している力覚の応答の遅れがQoEの劣化に関与していることも示唆された。

なお、図10によれば従来手法（点線）の方が提案手法よりも操作力が小さい。これは従来手法では(4)式における e_s の項がないため、その分粘性抵抗が小さいことが理由として考えられる。同時に、操作力を強くすると図8のように振動が激しくなるため、操作力を上げられないことも一因である。

5 結言

本論文では、まず、綱引きやおしくらまんじゅうのような継続的な力学的インタラクションを多人数で実現するハプティックネットワークゲームの制御構成について述べた。ついで提案の制御手法を用いて落下誘導ゲームのQoEを主観評価と客観評価の双方から評価を行った。MOSによる5段階評価では、通信遅延の増加に応じてQoEが劣化することが確認されたが、その劣化は国内における通信遅延の範囲では有線、無線に関わらずプレーヤにとって気にならない程度であることが明らかとなった。提案手法では、RTT=250[ms]におけるMOSが従来手法のRTT=25[ms]のそれに相当するほどの良好な結果を得た。ただし、ゲームの得点や初得点までの所用時間を用いた客観評価に基づけば、通信遅延の増加がゲームの難易度を上げることは確かである。

回帰分析では、今後のハプティックネットワークゲームの改善は、力覚の観点よりも視覚の観点に注力すべきであることが示唆された。また、QoEに影響を与えるものとして、通信遅延そのものに加え、通信遅延に由来する力の増加も関与することが示唆された。

提案の制御手法は、劣化はするもののRTT=400[ms]の環境においても安定的に力学的インタラクションを実現できるため、ハプティックネットワークゲームの実用化に大きく前進するアルゴリズムであると考えられる。

なお、本論文においては通信遅延のジッタがない条件下で評価を行った。しかしながら、実際のインターネット環境ではジッタも品質の劣化に影響を与えることが予想される。今後の課題として、本制御アルゴリズムに対するジッタの影響を定量的に明らかにしていく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24360090 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] <http://manuals.playstation.net/document/jp/ps4/settings/controller.html>
- [2] http://www.nintendo.co.jp/wii/wiiware/wkbj/pdf/man_wkbj.pdf
- [3] Dan Morris, Neel Joshi, Enneth Salisbury: Haptic Battle Pong: High-Degree-of-Freedom Haptics in a Multiplayer Gaming Environment; Experimental Gameplay Workshop in Game Developers Conference 2004, (2004. Mar.)
- [4] Yusuke Hara, Yutaka Ishibashi, Norishige Fukushima, Shinji Sugawara: Adaptive Delta-causality Control Scheme with Dynamic Control of Prediction Time in Networked Haptic Game; ACM The 11th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames), (2012. Nov.)
- [5] Jung Kim, Hyun Kim, Joel Jordan, Jesper Mortensen et. al.: Transatlantic Touch: A Study of Haptic Collaboration over Long Distance; PRESENCE: VOLUME 13, NUMBER 3, pp.328-337 (2006. June)
- [6] Mee Y. Sung, Yonghee Yoo, Kyungkoo Jun, Nam-Joong Kim, Jinseok Chae: Experiments for a Collaborative Haptic Virtual Reality; The 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 174-179 (2006. Nov.Dec.)
- [7] Lingzhi Liu, Guanyang Liu, Yuru Zhang, Weidong Guo, Keke Lu, Moyuan Zhou: Separate DOF Control and Mutual Guidance in Networked Haptic Collaboration Maze Game: Design and Evaluation; IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.913-918 (2011. May)
- [8] 橋本 達也, 石橋 豊: 協調作業を用いたネットワーク型リアルタイムゲームにおける触覚メディアの端末間同期制御の効果; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌「ハプティックインタラククション」特集号, vol. 13, no. 1, pp. 3-13 (2008. Mar.)
- [9] Pingguo Huang, Yutaka Ishibashi, Norishige Fukushima, 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), vol. 5, no. 6, pp. 321-331 (2012. June)
- [10] 三好孝典, 今村孝他: マルチラテラル遠隔制御によるインターネット上での仮想綱引きゲームの実現; 第12回力触覚の提示と計算研究会予稿, 日本バーチャルリアリティ学会, (2013. Mar.)
- [11] Yohsuke Morita, Yuya Ogawa, Takashi Imamura, Akira Kawaguchi, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima: Design Method for Multilateral Tele-Control to Realize Shared Haptic Mouse and Its Application to Intercontinental Game; Proc. of Interaction 2014 Processing Society of Japan, pp.346-353 (2014. Feb.)
- [12] Yosuke Morita, Yuya Ogawa, Yasunori Kawai, Takashi Imamura, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima: Design Method for Multilateral Tele-Control to Realize Shared Haptic Mouse; SICE Annual Conference 2013, 2220-2226 (TuBT8.3) (2013. Sep.)
- [13] Daisuke Yashiro, Dapeng Tian, Kouhei Ohnishi: Centralized Controller based Multilateral Control with Communication Delay; Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, pp.991-996 (2011. Apr.)
- [14] Takahiro Kanno, Yasuyoshi Yokokohji: Multilateral Teleoperation Control over Time-Delayed Computer Networks using Wave Variables; IEEE Haptics Symposium, pp.125-131 (2012. Mar.)
- [15] Dongjun Lee, Oscar Martinez-Palafox, Mark W. Spong: Bilateral Teleoperation of Multiple Cooperative Robots over Delayed Communication Networks: Application; Proc of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.368-373 (2005. Apr.)
- [16] Victor Mendez, Mahdi Tavakoli: A Passivity Criterion for N-Port Multilateral Haptic Systems; 49th IEEE Conference on Decision and Control, pp.274-279 (2010. Dec.)
- [17] ITU-T Rec. P.10/G.100 Amendment 2, "Vocabulary for Performance and Quality of Service", (2008. July)
- [18] ITU-T BT. 500-11 "Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures", International Telecommunications Union, (2002. June)
- [19] <http://www.geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview>
- [20] <http://www.novint.com/index.php/novintfalcon>
- [21] Robert J. Anderson, Mark W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay; IEEE Transactionson on Automatic Control, Vol.34, No.5, pp.494-501 (1989. May)
- [22] Guenter Niemeyer, Jean-Jacques E. Slotine: Telemanipulation with Time Delays; Int. Journal of Robotics Research; Vol. 23, No. 9, pp.873-890, 2004
- [23] Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Takashi Imamura: Design Method of Multilateral Tele-Control for Multi-Client and Multi-Coupled Physical Model Server; IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO2013), pp.206-211(Paper FrC2.6), (2013. Nov.)
- [24] Samprit Chatterjee, Ali S. Hadi: Regression Analysis by Example; John Wiley & Sons, Hoboken, 1999.

(2014年6月16日受付)

[著者紹介]

三好 孝典



1963年11月1日生。1989年3月大阪大学電気工学科卒業。ローランド・ディー・ジー(株)入社。2001年3月豊橋技術科学大学博士後期課程電子情報工学専攻修了。2002年4月豊橋技術科学大学生産システム工学系講師。現在、同大機械工学系准教授。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE等の会員。博士(工学)

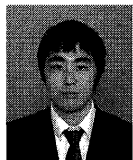
三好・前田・森田・石橋・寺嶋：マルチラテラル遠隔制御理論に基づくハプティックネットワークゲームの作成と通信遅延がQoEに及ぼす影響の調査

前田 慶博



2013年、名古屋工業大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科創成シミュレーション工学専攻博士前期課程に在学中。高臨場感通信におけるQoE評価に関する研究に従事。

森田 陽介



2012年、舞鶴工業高等専門学校専攻科電気・制御システム工学専攻終了。2014年、豊橋技術科学大学工学研究科機械工学専攻終了。同年、株式会社村田製作所入社、現在に至る。

石橋 豊 (正会員)



1981年、名古屋工業大学工学部情報工学科卒業。1983年、同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社入社、NTT ヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て、1993年より名古屋工業大学工学部電気情報工学科助教授。現在、同大学大学院教授。分散マルチメディアの研究に従事。工学博士。

寺嶋 一彦



1952年6月24日生。1981年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1982年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手。講師、助教授を経て1994年同大教授。システム制御情報学会、日本機械学会、日本 Casting 工学会、IEEE等の会員。工学博士