

LK\_001

# 混成型遠隔力覚共有システムの開発と評価

## Development and Evaluation of a Hybrid Shared Tele-Haptic System

山開 真二<sup>†</sup> 賀川 経夫<sup>‡</sup> 西野 浩明<sup>‡</sup> 宇津宮 孝一<sup>†</sup>  
 Shinji Yamabiraki Tsuneo Kagawa Hiroaki Nishino Kouichi Utsumiya

### 1. はじめに

近年、触力覚提示技術の進展により、仮想空間中の3次元物体を触知することが可能になる触力覚インタフェースが視・聴覚に続く新たな対話手段として注目されている。また、市販の力覚インタフェース装置を組込んだ分散仮想環境 (DVE: Distributed Virtual Environment) の構築に関する研究も盛んに行われている。触力覚を用いることで、遠隔地にいる複数の利用者が、仮想空間中の3次元物体を共同で移動・変形したり、遠隔地のロボットを精度よく操作したりするといった作業がリアルに実行できる。

しかし、利用者に自然な力覚を提供するためには、力覚情報を高速に更新・提示する必要がある。通常、視覚情報の更新率が30Hzであるのに対して、力覚情報は1KHzの更新率が要求される。したがって、ネットワーク上で力覚情報を送受信する場合には、ネットワーク遅延やパケット損失などによるネットワーク品質 (Quality of Service; QoS) の低下が触力覚提示の品質低下につながる。また、従来のクライアント・サーバ型システムでは、クライアント数が増加するにつれてサーバの負荷が増大し、システム全体の応答性が低下するという問題もある。

我々は、遠隔地間の複数利用者に自然な力覚情報を安定して提示できるDVEの構成法について研究している。近年、九州・韓国間のネットワーク環境の整備が急速に進み、2001年にはKJCN (Korea Japan Cable Network) と呼ばれる海底光ケーブルが施設された (図1)。現在では、この高速ネットワーク環境を利用して日韓で遠隔テレビ会議などが行われている [1]。我々は韓国科学技術研究院 (Korea Institute of Science and Technology; KIST) や九州大学のVR研究グループと共同研究を行っており、日韓共同のDVE応用システムを構築することを目標としている。

本稿では、力覚の高速処理とシステムの拡張性・整合性を両立させるために考案したアーキテクチャの特徴と構成、及びその拡張性に関する実験結果について述べる。

### 2. 関連研究

多くの関連研究から、視・聴覚情報のみを用いたシステムと比べて、力覚インタフェースを実装したシステムの方が利用者に高い現実感と一体感を与えることが報告されている [2]。我々は、2人の遠隔利用者が3次元物体を協同で把持して、仮想空間中の決められたルートを移動させるという実験を行い、力覚装置を用いた協同作業の方が視覚情報だけの作業よりも約3倍早く作業が完了したという結果を得ている。

また、力覚装置を組込んだDVEを構築する際に必須となる力覚情報の通信技術に関しても多くの研究が行われて

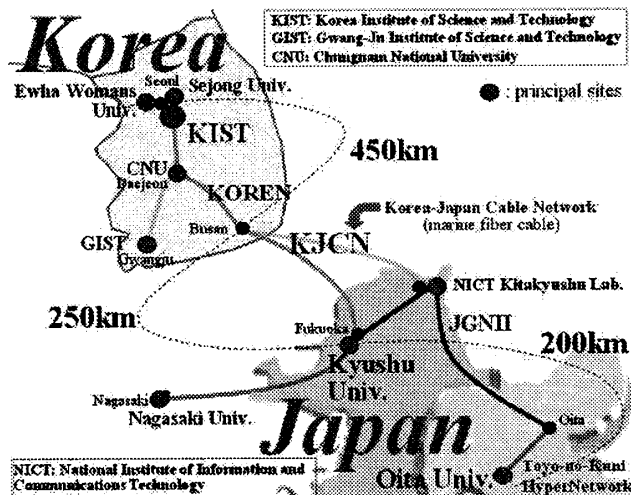


図1. KIST-大分大学間のネットワーク。

いる [3]。しかし、その多くは専用線やLAN環境などを用いており、インターネットのような品質を保証しない環境を想定したものは少ない。長谷川らはクライアント・サーバによる力覚装置の共有法を提案しており、クライアント間のメディア同期制御と情報の因果順序制御を実現している [4]。この手法は、クライアント間で仮想環境の整合性を保証するが、利用者を2人に限定して実験を行っており、3人以上の場合は検証されていない。引地らは力覚共有システムを利用する際のネットワークQoSに関して、利用者が安定して作業することが可能な許容限界値の計測を行っている [5]。引地らはクライアント・サーバ型のシステムにおいて、利用者に提示する反力の計算をサーバ側、およびクライアント側の2通りで実行する場合に分けて実験・検証を行った。反力計算をサーバ側で行う場合の許容値が20ミリ秒であるのに対して、クライアント側で行う場合はその4倍の80ミリ秒であると報告している。

このように、先行・関連研究の多くが、2台のクライアントから構成される1対1の利用形態を想定しており、3台以上のクライアントによる、より一般的なDVEを想定した実験・検証は行われていない。我々は、実際に3台以上の力覚装置が接続できるDVEを構築し、クライアント数が増加した場合のシステムの拡張性に関する影響を実験・検証した。

### 3. システム構成

本システムでは、力覚装置に米国 SensAble Technologies 社製の PHANTOM を使用した。

#### 3.1 クライアント・サーバ間の処理の流れ

図2に提案する通信制御方式について、クライアント・サーバ間の処理の流れを示しながら説明する。

<sup>†</sup> 大分大学 大学院 工学研究科 知能情報システム専攻

<sup>‡</sup> 大分大学 工学科 知能情報システム工学科

あるクライアントからサーバや他のクライアントに送信される力覚情報は、力覚装置から取得した力覚カーソル(利用者が把持する筆型効果器(スタイラス)の先端部分の位置に相当)の3次元位置情報、ボタンのオン・オフ情報、および各クライアントの識別番号である(図2-a)。また、サーバから各クライアントに送信される情報は、新たに更新されたMVRDBの仮想空間情報であるが、これには、共有仮想物体の3次元位置情報や新規に接続してきたクライアント情報が含まれる(図2-c)。

本方式では、3次元物体や力覚カーソルなどの仮想空間に関する属性情報はVRデータベースで管理される。VRデータベース(VRDB)は、各クライアントがローカルにもつクライアントVRDB(CVRDB)と、サーバがもつマスタVRDB(MVRDB)の2つからなる。クライアントは、グラフィックス(30Hz)と力覚(1KHz)の2つの更新処理を並列に処理するために、アプリケーションスレッドと力覚サーボループスレッドという2つのスレッドから構成される。まず、各クライアントが、力覚カーソルの情報を取得して、サーバと他のクライアントに送信する(図2-a)。このときCVRDBは更新しない。次に、サーバが、全てのクライアントから受信した力覚カーソル情報に基づいてMVRDB中の仮想物体の位置や状態情報を更新し(図2-b)、各クライアントに更新結果をマルチキャスト送信する(図2-c)。最後に、各クライアントが、サーバから受信したMVRDBの更新内容を自身のCVRDBに反映して更新結果を描画する(図2-d)。

このように提案手法では、処理の高速化のために各クライアントが個別に保持するCVRDBをMVRDBと同期させながら仮想空間の整合性を維持している。

### 3.2 力覚情報の応答性

先に述べたように、視覚情報の更新率は30Hz、力覚情報は1KHzと大きく異なっており、特に力覚情報は高速に更新されなければならない。クライアント・サーバ型システムでは、仮想空間情報および力覚情報の双方が一度サーバを経由して、他のクライアントに配信される。そのため、サーバへ負荷が集中してその処理速度が低下すると、視覚的な違和感に加えて、力覚提示の安定感も低下する。特に、力覚装置は、手の動作入力とその動作に対する反力提示という双方向型入出力装置として機能するという性質から、入力動作に対する反力のわずかな遅れが大きな違和感となって利用者に触知される。また、ネットワークQoSの劣化が発生した場合は、その影響がさらに大きくなる。

そこで提案手法では、図3のような混成型通信方式を考案した。これは、クライアント・サーバモデルによって仮想空間の整合性を維持しつつ、ピアツーピアモデルで力覚情報の応答性を確保するものである。力覚情報は、各クライアント間でピアツーピアに通信され、サーバを経由せずに直接クライアント間で低遅延に送受信される。これにより、1KHzの更新率を維持したまま力覚情報がクライアント間で共有できるようになる。一方、クライアント間の仮想空間属性に関する同期処理は、3.1で述べた仕組みによってサーバを介して行われ、30Hzの更新率で利用者にグラフィックス提示される。このように、非同期・高速な力覚情報共有と同期・低速な仮想空間(グラフィックス)更新処理を並行動作させることで、サーバの過負荷状態やネ

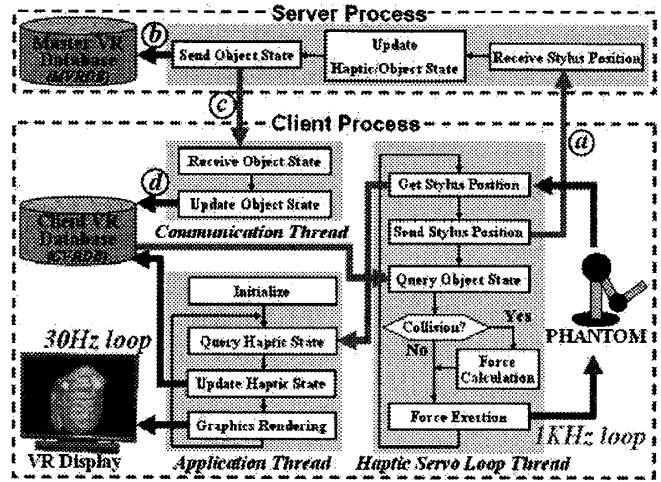


図2. クライアント・サーバ間の処理の流れ。

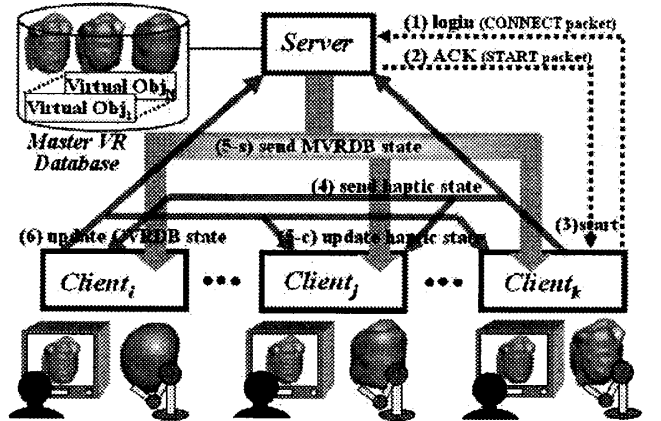


図3. システム構成。

ットワーク QoS の低下に伴うシステムの拡張性や安定性の劣化を防止できるようにした。

さらに、我々は「マルチモーダル環境における視覚の優位性」を利用することを考えている。Srinivasanらは、仮想物体の硬さや材質感を認識する際には、視覚情報が力覚情報よりも優位に働くと報告している[6]。すなわち、視覚情報の整合性が利用者間で保証できれば、1KHzの更新率を維持する力覚情報に多少の遅延誤差が生じて、利用者に違和感を与えることなく作業が実行できる。KIST-九州間のような遠距離通信においてはネットワークQoSの影響で、力覚情報の整合性を十分に維持できない場合があるが、視覚の優位性を活用することで、違和感のない遠隔力覚共有を実現している。

新規に参加するクライアントのログインから力覚処理が開始されるまでの処理の流れは以下ようになる。

- ・ログイン(図3-1)  
新規参加のクライアントがサーバへログインを要求。
- ・ログイン処理(図3-2)  
接続してきたクライアントにMVRDBの情報を送信。
- ・力覚処理の開始(図3-3)  
CVRDBをMVRDBと同期させ、力覚処理を開始。
- ・力覚情報の送信(図3-4)  
力覚情報をピアツーピア通信で全クライアントおよびサーバへ送信。
- ・MVRDBの更新(図3-5-s)

更新した MVRDB の情報を各クライアントに送信。

- ・ CVRDB 内の力覚情報の更新 (図 3-5-c)  
各クライアントが更新情報を元に CVRDB を変更。
- ・ CVRDB 内の仮想空間情報の更新 (図 3-6)  
更新された情報を元に新たなイメージを再描画。

#### 4. 評価実験

提案方式を用いて、3 台以上の力覚装置を接続して協調作業ができる DVE を構築し、クライアント数とサーバの応答時間の関係を計測し、提案手法におけるシステムの拡張性について評価実験を行った。

##### 4.1 実験タスク

本実験では、仮想物体を協同で持ち上げるタスク (共有物体操作) と遠隔握手に類似したタスク (装置共有操作) の 2 つのタスクを用いて実験を行った。図 4 に実験用アプリケーションの実行画面を示す。小さい球が各クライアントの力覚カーソルを表し、大きい球が共有物体操作の対象となる仮想物体を表している。

共有物体操作は、仮想物体である 4 つの大きい球を利用者が協同で持ち上げながら仮想空間内に配置されたボックスに入れるもので、仮想物体をとおして力覚情報を共有する、粒度の粗い共有操作である。一方、装置共有操作は、利用者同士が仮想的に 1 つの力覚装置を共有 (同じ装置を把持) して、遠隔地の利用者の動きや力を感じながら手振り動作を行う作業である。これは、クライアント間で手の動作をリアルタイムに共有する、粒度の高い操作である。

装置共有操作は、操作を行っている利用者のカーソル位置の重心に向かう力を算出して提示することにより実現している。2 人で行う場合は、相手のカーソルに引っ張られるような力が働き、3 人で行う場合は、3 つのカーソルの中心に引き付けられるような力が働く。4 人以上の場合も同様である。装置共有操作では、全利用者と同じ反力を同時に提示するため、複数の利用者間で 1 つの装置を共有しているような操作感が実現できる。

##### 4.2 QoS 計測実験

先に述べたように、我々は日韓網のような遠距離通信環境においても自然な力覚共有が実現できる DVE の構築を目的としている。そこで、我々は予備実験として KIST-大分大学間を対象に、実環境におけるネットワーク QoS の計測実験を行った。

実験結果を表 1 に示す。本実験では、KIST-大分大学間のデータ転送において、パケットが往復する際に生じるネットワーク遅延時間とパケット損失回数を計測した。提案手法では、サーバ上の MVRDB で仮想空間の情報を管理し、各クライアント上の CVRDB は MVRDB と同期を取りながら仮想空間の整合性を保証している。そのため利用者がアクションを起こしてから CVRDB が更新されるまでの応答時間は、力覚情報がクライアント・サーバ間を往復するのに必要な時間に大きな影響を受ける。このような理由から、両組織間で送信データが往復する際の遅延時間およびパケット損失率を計測した。

実験結果より、KIST-大分大学間では、3.2 で述べた視覚の優位性を利用できることが分かった。視覚の優位性の考えから、30Hz の更新率で視覚情報の一貫性が保証できれば、利用者に操作上の違和感を与えることなく、力覚情報の誤差を打ち消すことができる。実験結果から、ネット

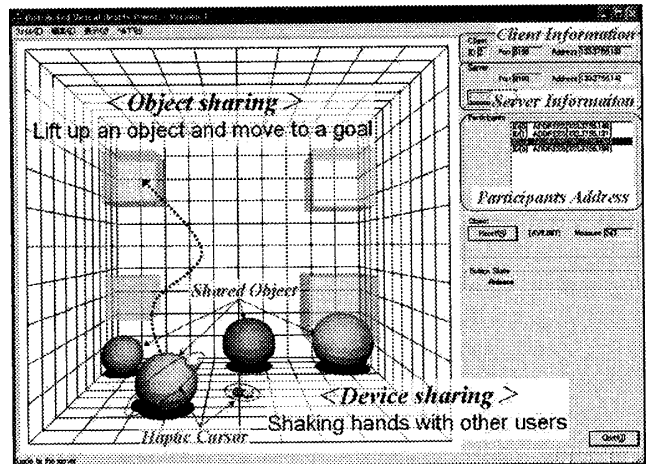


図 4. 実験タスクの実行画面。

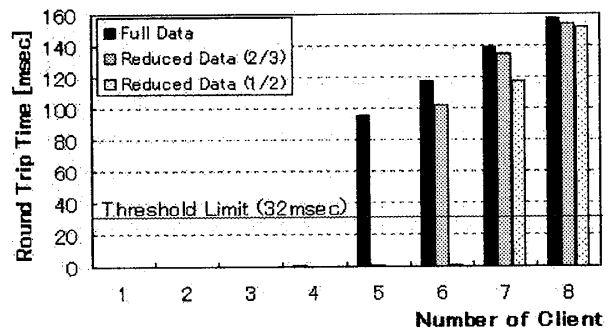


図 5. 応答時間。

表 1. QoS (KIST-大分大学)。

	Average	Maximum	Minimum
Delay	16.9msec	124.6msec	16.0msec
	Loss rate	Total packet	lost packet
Packet loss	0.007%	1,484,363	106

表 2. ネットワーク QoS の許容限界値。

	Delay	Packet loss	Jitter
Object Sharing	32msec	53%	60msec
Device Sharing	13msec	40%	25msec

ワーク遅延の平均値は 16.9 ミリ秒であり、30Hz の更新率が保証できることが分かった。

##### 4.3 拡張性評価実験

図 5 は、クライアント数を増やしながら仮想物体操作を行い、サーバからの応答時間の変化を計測した結果である。応答時間とは、クライアントが力覚装置で操作を行ってから、サーバでその操作を元に仮想空間を更新し、その更新結果がクライアントに戻ってくるまでの時間である。第 1 系列(Full Data)はクライアントから送信されるすべての力覚情報を処理したときの応答時間を示し、第 2・第 3 系列(Reduced Data)は、力覚情報の送信量を 3 分の 2、2 分の 1 に軽減したときの応答時間を示している。

また、図中の横線は、共有物体操作時のネットワーク遅延に対する許容限界値である 32 ミリ秒を示している。この値は、事前にネットワークを用いて行なった評価実験で得られたものである[7]。表 2 に共有物体操作と装置共有操作のネットワーク QoS の許容限界値を示す。

実験結果より、提案手法で安定した同時接続が可能な最大クライアント数は4システムであることが分かった。また、送信データ数の削減によるトラフィック軽減の有無に関係なく、一定のクライアント数になると応答性が急激に悪化することが判明した。

#### 4.4 考察

図6は、サーバに HP XW6200 (CPU: Xeon 3.6GHz, Memory: 2GB)を採用し、サーバが1秒間に処理した要求数(力覚情報)と処理できずにバッファに蓄積した要求数の変化を示す。あるクライアント数になると応答性が急激に悪化することが図5から判明したが、これはサーバが1秒間に処理できる要求数を上回る要求が発生し、未処理の要求が急激に増加したことが原因である。データ削減なし(Full Data)の場合、クライアント数が1増加する毎に、1秒間の要求数は約1000個増加する。4以下のクライアント数では、サーバはすべての要求を処理しているが、クライアント数が5(要求数は毎秒5000個)になると、サーバは4500程度しか処理できず、1秒毎に約500個の未処理の要求が蓄積されていく。このように、最大同時接続数(Full Dataでは4)を超える接続があった場合、システムの応答性は急激に悪化し、利用者に安定した力覚が提示できなくなることが分かった。

サーバ側で処理する要求数を軽減するため、各クライアントからの要求数を削減した場合は、最大同時接続数を改善できることが図5、6から分かる。今回行ったデータ削減方法は、3分の2の場合は3回中2回だけ送信し、2分の1の場合は2回に1回の頻度で送信を行うという最も単純な方法である。しかしながら、このような方法で過度のデータ削減を行うと、不自然な力覚提示による操作精度の悪化や現実感の低下といった問題が発生するため、利用者に操作上の違和感を与えないような力覚情報の削減手法を開発することが、今後の課題である。

図7は、サーバに TOSHIBA Dynabook (CPU: Pentium4-M 1.8GHz, Memory: 768MB: 図7 - Server1)と HP XW6200 (CPU: Xeon 3.6GHz, Memory: 2GB: 図7 - Server2)の2種類のマシンを用いたときの処理能力の差を示している。この図から最大同時接続数は、Dynabookが2、HPが4となる。同様に、力覚情報を3分の2、2分の1に削減したときのデータも計測したが、HPの最大同時接続数はDynabookの約2倍になった。このことから、最大同時接続数はサーバの性能に強く依存することが分かった。

#### 5. まとめ

本論文では、提案する混成型遠隔力覚共有システムの構成法と、その拡張性に関する評価実験について述べた。実験結果から提案システムがサポートできる力覚クライアントの最大同時接続数は、データ削減なしの場合が4、3分の2の場合が5、2分の1の場合が6であることが分かった。また、最大同時接続数を超える接続があった場合、サーバの応答性が急激に悪化することから、システムの最大同時接続数を適切に把握することは、利用者に自然な力覚を提示する上で重要であることが分かった。

今後は、利用者に操作上の違和感を与えず、サーバの負荷を軽減し、システムの最大同時接続数を向上させる手法とその定式化について検討する予定である。

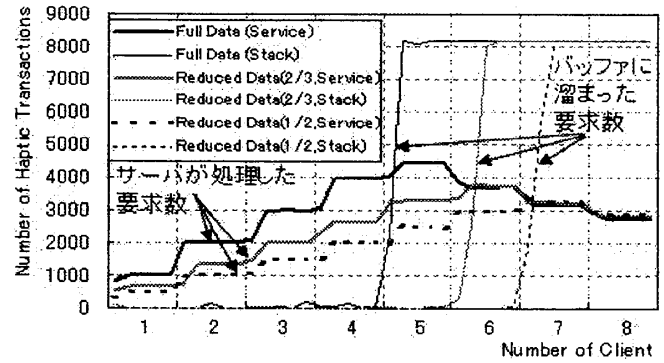


図6. サーバのサービス状況.

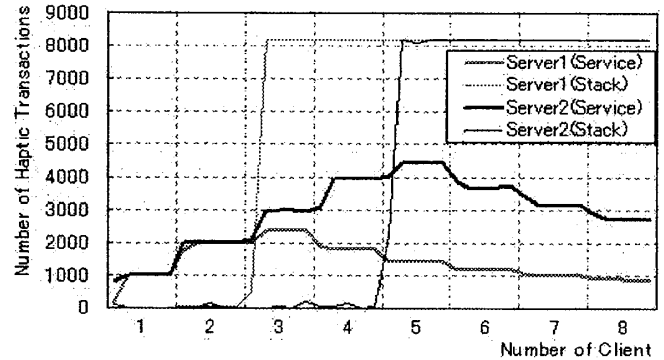


図7. サーバ別のサービス状況の比較.

#### 参考文献

- [1] H. Nishino, S. Yamabiraki, Y. -M. Kwon, Y. Okada, and K. Utsumiya: A Distributed Virtual Reality Framework for Korea-Japan High-Speed Network Testbed, Proc. IEEE AINA2006, Vol.1, pp.433-438, 2006.
- [2] X. Shen, J. Zhou, A. E. Saddik, and N. D. Georganas: Architecture and Evaluation of Tele-Haptic Environments: Proc. Of the IEEE DS-RT'04, pp.53-60, 2004.
- [3] R. T. Souaved, D. Gaiti, G. Pujolle, W. Yu, Q. Gu, and A. Marshall: Haptic Virtual Environment Performance over IP Networks: A Case Study, Proc. Of the IEEE DS-RT'03, pp.181-189, 2003.
- [4] 長谷川貴彦, 石橋豊, 田坂修二: 分散仮想環境における触覚メディアの因果順序制御及び端末間同期制御, 信学技報, CQ2002-133, pp.19-24, 2002.
- [5] 引地謙治, 森野祐直, 福田一郎, 松本壮樹, 瀬崎薫, 安田靖彦: 触覚を含む仮想空間共有システムの提案と評価, 信学論, Vol.J86-B, No.2, pp.268-278, 2003.
- [6] M. A. Srinivasan, G. L. Beauregard, and D. L. Brock: The Impact of Visual Information in the Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments, Proc. ASME Dynamic System and Control Division, DSC, Vol.58, pp.555-559, 1996.
- [7] S. Yamabiraki: A Framework for Realistic Haptic Communication Using Gigabit Network, APII Workshop, 2005. [http://anf.ne.kr/news/APII\\_Workshop\\_2005.htm](http://anf.ne.kr/news/APII_Workshop_2005.htm).