

触覚インタフェース装置を用いた協調作業における端末間同期制御の効果

兼岡 弘幸^{†a)} (学生員) 石橋 豊[†] (正員)

Effects of Inter-Destination Synchronization Control in Collaborative Work with Haptic Interface Devices

Hiroyuki KANEOKA^{†a)}, Student Member and

Yutaka ISHIBASHI[†], Member

[†] 名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻, 名古屋市

Department of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: hiro_k@mcl.elcom.nitech.ac.jp

あらまし 本論文では, 触覚インタフェース装置を用いた協調作業において, 触覚メディア出力品質に対する端末間同期制御の効果を, 主観及び客観評価の観点から調査する. 端末間同期制御とは, 端末間でメディアの出力タイミングをそろえる制御のことである. そして, どのような客観評価尺度が重要であることを明確にするため, 主観評価結果と客観評価結果の関係を調べる.

キーワード 協調作業, 触覚メディア, 端末間同期制御, 主観評価, 客観評価

1. ま え が き

CG (computer graphics) により構築された分散仮想環境において, 触覚インタフェース装置を用いた協調作業への関心が高まっている [1]. この装置を用いることにより, 利用者は仮想空間内の物体に触れることができるので, 遠隔手術のシミュレーションや遠隔設計などの協調作業の効率を大きく改善することができる. しかし, ネットワークを介して触覚メディアを転送すると, ネットワーク遅延の揺らぎなどにより, メディアの出力品質が劣化したり, 端末間の公平性が損なわれるおそれがある.

筆者らは, この問題点の解決策の一つとして, 端末間の出力タイミングをそろえる端末間同期制御を用い, その有効性を示している [2]. 文献 [2] では, 二つの触覚インタフェース装置を用いた協調作業において, 端末間同期制御により早い方の出力タイミングに合わせる方法が有効であることを客観評価により示している. しかし, 端末間同期制御を行わない場合との比較において, 触覚メディア出力品質の差が大きく現れてはいないため, 必ずしも十分には端末間同期制御の有効性を示しているとはいえない. そこで, 主観評価を行い, 端末間同期制御の効果を明らかにする必要がある. ま

た, これまで, 触覚インタフェース装置を用いた協調作業において, メディア出力品質の主観評価結果と客観評価結果の関係も十分には明らかにされていない. これは, どのような客観評価尺度が重要であることを明確にするためにも重要である.

そこで, 本論文では, 二つの触覚インタフェース装置を用いた協調作業において, 触覚メディア出力品質に対する端末間同期制御の効果を主観及び客観評価の観点から調査する. そして, これらの評価結果の関係を明らかにする. そのため, 文献 [3] と同様に, まず客観評価尺度に対して主成分分析を行い, いくつかの主成分を抽出する. 次に, これらの主成分と関係の深い客観評価尺度の一つずつ取り出し, 主観評価結果との関係を重回帰分析によって調査する.

以下では, まず 2. で端末間同期制御を概説する. 次に 3. において実験に用いるシステムや実験方法を述べ, 4. で実験結果について考察する.

2. 端末間同期制御

本論文では, 端末間同期制御のために, 文献 [2] と同様に, 同期マエストロ方式を用いる. 各クライアントは, 最初のメディアユニット (同期制御を行う際の基本単位. 以下, MU と略す) を受信すると, VTR (Virtual-Time Rendering) メディア同期アルゴリズム [4] によって, その MU の出力時刻を決定する. そして, MU の出力開始時に, 同期マエストロに出力開始時刻を通知し, 後続の MU の出力タイミングを変更する必要があるか否かを問い合わせる. その後, VTR アルゴリズムによって, 出力タイミングが変更される場合にも, 同期マエストロに変更後の出力タイミングを通知する. また, 各クライアントは, 一定数の MU が連続してそれらの目標出力時刻 (MU が出力されるべき時刻) [4] よりも早く到着したり, 遅く到着する場合に, 同期マエストロに出力タイミングを変更すべきか否かを問い合わせる.

同期マエストロは, 各クライアントから受信する出力タイミングに関する情報から, 基準とすべき出力タイミング [2] を決定し, 全クライアントに通知する. また, 一定時間ごと (3. では 5 秒) にも, 全クライアントに基準とすべき出力タイミングに関する情報を送信する. これは, 情報の欠落に対応するためである.

各クライアントは, 基準とすべき出力タイミングに沿って出力することにより, 端末間同期を実現する. 出力タイミングが基準とすべきものと異なる場合, 少しずつ出力タイミングを基準とすべきものに合わせて

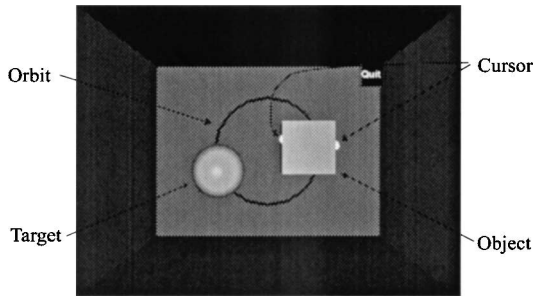


図 1 仮想空間の表示例

Fig. 1 A displayed image of the virtual space.

いく．この理由は，一度に大きく出力タイミングを変更すると，出力品質が大きく劣化する可能性があるからである．端末間同期制御の詳細については，文献 [2] を参照されたい．

本論文では，基準とすべき出力タイミングの決定方法として，早い方の出力タイミングに合わせる方法を用いる（以下，IDS と呼ぶ）．そして，端末間同期制御を行わない場合（VTR アルゴリズムによるメディア内同期制御のみが行われるので，VTR と略す）との触覚メディア出力品質の比較を行う．

3. 実験方法

実験では，文献 [2] と同様に，2 人の利用者が図 1 の壁に囲まれた三次元仮想空間（高さ：89.7 mm，横幅：129.7 mm，奥行：89.7 mm）において，PHANToM DESKTOP [5]（以下，PHANToM と略す）を用い，オブジェクトを挟んで持ち上げ，等速円運動（10 秒で円軌道を 1 週）する目標物体（半径が仮想空間の高さの 1/8 である球）を内包するように移動させる作業を行う．オブジェクトは，傾かない立方体（剛体であり，その 1 辺の長さは仮想空間の高さの 1/4）とする．オブジェクトの重さは 0.5 kg とし，重力加速度を 2.0 m/s^2 とする．

3.1 実験システム

実験システムは，図 2 のように，サーバ（CPU: Pentium4 2.26 GHz, OS: FreeBSD），クライアント 1（CPU: Pentium4 2.00 GHz, OS: Windows2000, グラフィックカード：3Dlabs WildcatII），クライアント 2（CPU: Pentium4 2.26 GHz, OS: Windows2000, グラフィックカード：3Dlabs OXYGEN VX1），及び PC1 から PC4 を一つの Ethernet スイッチングハブと二つの Ethernet シェアドハブ（10BASE-T）に接続する．スイッチングハブを用いる理由は，シェアド

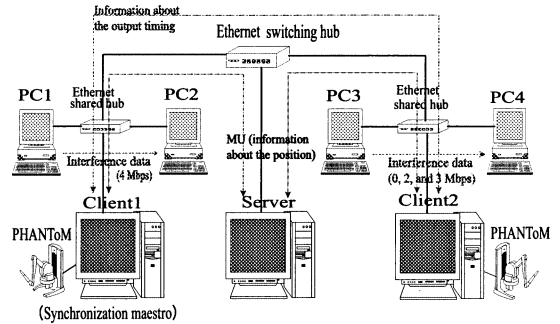


図 2 実験システム構成

Fig. 2 Configuration of the experimental system.

ハブにかかる負荷がネットワーク全体に影響するのを防ぐためである．また，簡単のため，クライアント 1 に同期マエストロの機能をもたせている．

各クライアントは，1 ms ごとに PHANToM の位置情報を取得し，MU としてサーバへ送信する．サーバは，各クライアントから MU を受信すると，オブジェクトの移動を計算し，その位置情報を含む MU（PHANToM のカーソル位置情報も含まれる）を二つのクライアントへ送信する．サーバからクライアントへ送信される MU のサイズは 61 バイト，クライアントからサーバへのそれは 33 バイトである．このサイズの違いは，サーバからクライアントへ送信される MU には，オブジェクトの位置情報に加えて，PHANToM のカーソル位置情報も含まれるからである．

また，同期マエストロとクライアント間では，端末間同期制御のための情報を送受信する．この情報は，同期マエストロからクライアントへは 3 バイト，クライアントから同期マエストロへは 5 バイトである（情報量の 2 バイトの差は，クライアントの識別子のバイト数に相当する）．これらの情報と MU は，UDP によって転送される．

更に，干渉トラヒックとして，PC1 から PC2, PC3 から PC4 へ固定長（1472 バイト）の負荷メッセージを指数分布に従う間隔で送信する．PC1 の平均負荷（1 秒間に送信される負荷メッセージのビット数の平均）を 4 Mbit/s とし，PC3 の平均負荷を 0, 2, 3 Mbit/s と変更する．この負荷メッセージの転送にも UDP が用いられる．

3.2 評価方法

文献 [3] と同様に，主観評価のために，心理学的測定法の一つである一対比較法と Thurstone の比較判断の法則 [6] を用いる．一対比較法では，各評価対に対

して優劣の判定を行えばよいので、判定が容易であり、信頼度の高いデータを得ることができる。Thurstoneの比較判断の法則により、一対比較法で得られる順序尺度 [6] を距離尺度 [6] へ変換する。これは、距離尺度の方が順序尺度よりも統計処理に向いているからである。このようにして得られる距離尺度を心理的尺度 [3] として扱う。この尺度は、原点及び尺度の単位を任意に選ぶことができる。したがって、心理的尺度の絶対値は意味をもたず、値の差のみに意味をもつ。前述のように、評価対象はIDSとVTRの2種類とする。

被験者は、触覚インタフェース装置を用いた協調作業の非熟練者（19歳から24歳の男女40名）であり、クライアント1のPHANToMを操作する。クライアント2のPHANToMは、1人の熟練者によって操作される。これは、被験者に対する条件をできるだけ同一にするためである。

一対比較法では、二つの評価対象（IDSとVTR）と三つの平均負荷（0, 2, 3 Mbit/s）から被験者へ提示する刺激を作成し、異なる二つの刺激の組合せを評価対とした。そして、評価対をランダムな順序で被験者に提示した。各評価対において、提示する刺激の順序もランダムである。被験者には、各評価対に対して主観的に操作しやすいと感じた方を選択するように指示した。

客観評価は主観評価と同時に行了れた。客観評価尺度として、オブジェクトと目標物体との平均距離 d 、出力間隔の変動係数 C_{output} 、及び端末間同期の平均二乗誤差 E_{group} [2] を測定した。オブジェクトと目標物体との平均距離は、オブジェクトの中心点と目標物体の中心点の距離の平均である。これは、目標物体の移動にどの程度正確に追従してオブジェクトを動かすことができるかを示す。出力間隔の変動係数とは、MUの出力の滑らかさを示す尺度である。端末間同期の平均二乗誤差は、二つのクライアントの発生時刻が等しいMUの出力時刻の差の二乗の平均であり、端末間の同期品質を示す。

この他、平均MU遅延 D 、平均MUレート R 、オブジェクトの速度の変動係数 C_{velocity} 、反力の平均 f 、及び反力の変動係数 C_{force} も測定した。これらの評価尺度の定義については、文献 [2], [4], 及び [7] を参照されたい。

4. 実験結果

4.1 主観評価結果

図3に、PC3の平均負荷に対する心理的尺度を示

す。ここで、Thurstoneの比較判断の法則はケースV（価値の分散は等しく、独立であると仮定）[6]を適用している。また、心理的尺度は最小値を0として処理される[3]。実験により得られた測定値は、黒塗りの記号で示されている。図より、IDSの心理的尺度の方が、VTRのそれよりも大きくなっていることが分かる。これは、触覚メディアはインタラクティブ性が重要であり、IDSにより早い方の出力タイミングに合わせることによって、VTRよりもインタラクティブ性を高く維持することができるからである。また、図では、平均負荷が2 Mbit/sを超えるあたりから、心理的尺度が大きく低下している。

4.2 客観評価結果

PC3の平均負荷に対する、オブジェクトと目標物体との平均距離、出力間隔の変動係数、及び端末間同期の平均二乗誤差をそれぞれ図4から図6に示す。これらの図中には95%信頼区間も示されている。

図4より、IDSのオブジェクトと目標物体との平均距離はVTRのそれよりも小さく抑えられている傾向にあることが分かる。これは、4.1で述べたように、

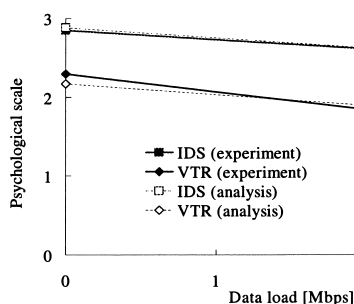


図3 心理的尺度

Fig.3 Psychological scale versus data load.

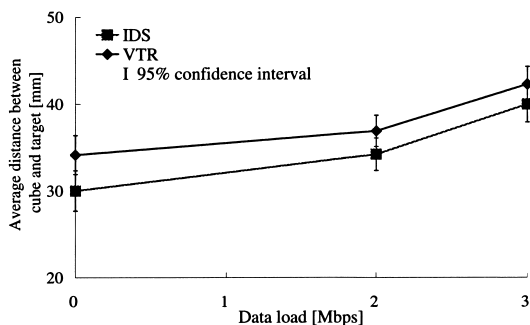


図4 オブジェクトと目標物体との平均距離

Fig.4 Average distance between the cube and the target.

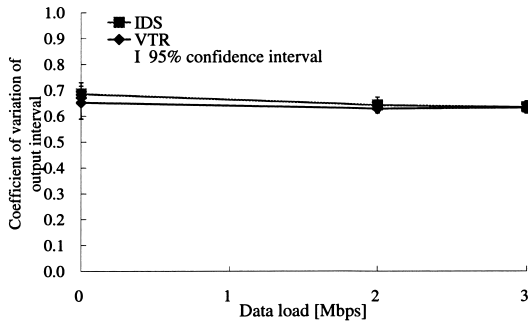


図 5 出力間隔の変動係数

Fig. 5 Coefficient of variation of output interval.

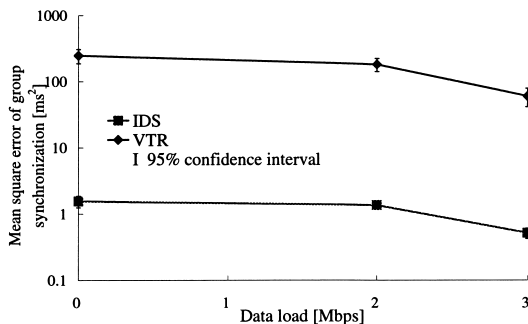


図 6 端末間同期の平均二乗誤差

Fig. 6 Mean square error of group synchronization.

IDS によりインタラクティブ性が高く維持され、操作がしやすくなるためである。

図 5 では、IDS の出力間隔の変動係数は、平均負荷が約 2 Mbit/s 以下のとき、VTR のそれよりもわずかに大きくなる傾向にある。これは、クライアント 1 のネットワークにかかる平均負荷が 4 Mbit/s であり、クライアント 2 のネットワークにかかる平均負荷よりも大きく、端末間同期制御によって出力タイミングが大きく変更されるためである。また、図 5 から、平均負荷の増加に伴い、IDS と VTR の変動係数の差が小さくなっていることが分かる。これは、クライアント 2 のネットワークにかかる平均負荷がクライアント 1 のそれに近づくためである。

図 6 より、IDS の端末間同期の平均二乗誤差は、VTR のそれよりも小さくなっていることが分かる。これは、端末間同期制御の効果である。

4.3 主観評価結果と客観評価結果の関係

ここでは、重回帰分析により主観評価結果と客観評価結果との関係を調べる。まず、実験で得られた客観評価結果に対して、主成分分析を行い、主成分を抽出

表 1 主成分負荷量

Table 1 Principal component loading.

Objective quality measure	Principal component		
	1	2	3
d	0.906	-0.412	-0.021
$C_{velocity}$	-0.426	0.871	-0.227
D	0.735	-0.329	0.522
R	-0.804	0.499	0.311
C_{output}	-0.559	0.811	-0.143
f	0.809	-0.379	0.369
C_{force}	0.909	-0.398	-0.123
E_{group}	-0.059	-0.110	0.988

する。その結果、三つの主成分までを用いると、累積寄与率が 97.7% となった。表 1 に主成分分析により得られた主成分負荷量 [3] を示す。主成分負荷量は、各客観評価尺度と主成分との相関を表す。表 1 では、各主成分と関係が深い主成分負荷量を太字で示している。

次に、各主成分と関係が深い客観評価尺度を一つずつ選択し、重回帰分析における独立変数とする [8]。また、主観評価より得られた心理的尺度を従属変数とする。このようにして重回帰分析によって得られた式のうち、自由度調整済み寄与率が最も高いものを次式に示す（寄与率は 0.988）^{注1)}：

$$\hat{S} = 31.326 - 0.336d - 26.768C_{output} - 0.040\ln(E_{group})$$
ここで、 \hat{S} は心理的尺度の推定値を表す。なお、重回帰分析では、 $\ln(E_{group})$ を独立変数として扱った。

図 3 には、心理的尺度の推定値（白ぬきの記号）も示されている。図 3 より、推定値と測定値はよく一致していることが確認できる。

したがって、今回の協調作業においては、オブジェクトと目標物体との平均距離、出力間隔の変動係数、端末間同期の平均二乗誤差を用いることによって、心理的尺度を高い精度で予測できるといえる。また（注 1）で示したように、オブジェクトと目標物体との平均距離の代わりに反力の変動係数、出力間隔の変動係数の代わりにオブジェクトの速度の変動係数を用いても、心理的尺度を高い精度で予測できる。

更に、上式において、何個の主成分を用いて予測するのが妥当であるかを検討する必要がある。そこで、 t 検定を行い、有意性の検討を行った。その結果、5% の有意水準において、第 1 主成分を用いる以外は有意

（注 1）：そのほかに寄与率が高かった式は、 $\hat{S} = 40.281 - 43.221C_{force} - 27.829C_{output} - 0.113\ln(E_{group})$ （寄与率は 0.971）、 $\hat{S} = 26.448 - 0.304d - 5.273C_{velocity} - 0.056\ln(E_{group})$ （寄与率は 0.965）、 $\hat{S} = 34.412 - 39.060C_{force} - 5.477C_{velocity} - 0.122\ln(E_{group})$ （寄与率は 0.949）であった。

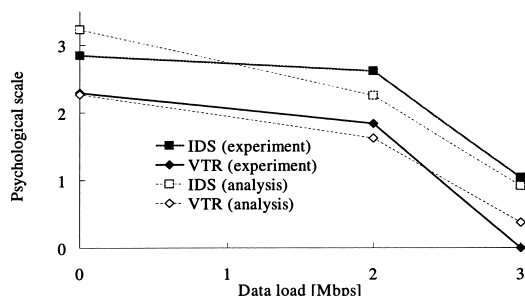


図7 オブジェクトと目標物体との平均距離を用いた心理的尺度の予測

Fig. 7 Prediction of psychological scale with the average distance between the cube and the target.

性はないと確認された((注1)でも同様)。この結果をもとに、第1主成分のみを用いて心理的尺度を予測することを考える。ここでは、特に第1主成分と関係が深い、オブジェクトと目標物体との平均距離、反力の変動係数を用い、回帰分析を行う。次式にその結果を示す： $\hat{S} = 10.225 - 0.233d$ (寄与率は0.896)、 $\hat{S} = 15.657 - 29.622C_{\text{force}}$ (寄与率は0.857)。

図7に、上記の2式のうち寄与率が高い、オブジェクトと目標物体との平均距離を用いた場合の心理的尺度の推定値(白抜ききの記号)を示す。図7より、図3ほど高い精度ではないが、心理的尺度を予測できていることが分かる。したがって、今回の協調作業においては、オブジェクトと目標物体との平均距離を測定することにより、ユーザの主観をある程度知ることができるといえる。しかし、より一般的な関係式がどれかを明らかにするためには、様々なネットワーク環境のもとで多様な協調作業を行い、同様の調査を行うことが必要である。これは今後の課題である。

5. むすび

本論文では、触覚インタフェース装置を用いた協調作業において、触覚メディア出力品質に対する端末間同期制御の効果を主観及び客観評価の観点から調査した。その結果、端末間同期制御により、触覚メディアの出力品質を高く保てることが分かった。更に、主観

評価結果と客観評価結果の関係を調べ、オブジェクトと目標物体との平均距離等のいくつかの客観評価尺度を用いることにより、心理的尺度を高い精度で予測できることを示した。今後は、今回の作業とは異なった内容の作業に対して、同様の調査を行う予定である。

謝辞 本研究は、平成16年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(課題番号16560331)によって行われた。

文 献

- [1] M.A. Srinivasan and C. Basdogan, "Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges," *Comput. Graph.*, vol.21, no.4, pp.393-404, April 1997.
- [2] Y. Ishibashi, T. Hasegawa, and S. Tasaka, "Group synchronization control for haptic media in networked virtual environments," *Proc. 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptics'04)*, pp.106-113, March 2004.
- [3] 伊藤嘉浩, 田坂修二, "音声・ビデオ伝送におけるメディア同期を対象としたユーザレベル QoS の定量的評価及びマッピング," *信学論(B)*, vol.J86-B, no.3, pp.485-498, March 2003.
- [4] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, "The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environments," *Proc. 16th International Workshop on Communication Quality & Reliability (CQR'02)*, pp.213-217, May 2002.
- [5] J.K. Salisbury and M.A. Srinivasan, "Phantom-based haptic interaction with virtual objects," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.17, no.5, pp.6-10, Sept./Oct. 1997.
- [6] 田中良久, *心理学的測定法 第2版*, 東京大学出版会, 1977.
- [7] T. Kanbara, Y. Ishibashi, and S. Tasaka, "Haptic media synchronization control with dead-reckoning in networked virtual environments," *Proc. 8th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'04)*, vol.III, pp.158-163, July 2004.
- [8] S. Tasaka and Y. Ito, "Psychometric analysis of the mutually compensatory property of multimedia QoS," *Conf. Rec. IEEE ICC'03*, pp.1880-1886, May 2003.

(平成17年5月9日受付)