

トレイグジスタンスの研究 (第 63 報) -TELESAR3 において許容される通信遅延の検討-

Study on Telexistence LXIII -Study of Tolerance of Network Delay for TELESAR3-

竹下佳佑¹⁾, 渡邊孝一²⁾, 佐藤克成¹⁾, 南澤孝太²⁾, 館暲²⁾

Keisuke Takeshita, Kouichi Watanabe, Katsunari Sato, Kouta Minamizawa and Susumu Tachi

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

(〒 223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1)

Abstract : In master-slave system, time delay between the human motion and display output is a large problem that induces postural sway of subjects during motion. In this study, we evaluated postural sway of subjects based on the center of gravity and whether the delay was able to be recognized for investigating the tolerance of the network delay with TELESAR3. By measuring delay that system possesses, the tolerance of the communication delay proved to have to make it to 18ms or less.

Key Words: Time Delay, Master-Slave System, Telexistence, Visual Movement

1. はじめに

ロボットの遠隔操作において、あたかもロボットの存在する環境にいるような高度な臨場感を操作者に与える技術は、トレイグジスタンスと呼ばれる。我々はこれまで、マスタースレーブシステム TELESAR3 の開発を行ってきた。

TELESAR3 の頭部システムは、腰に 2 自由度を持つ人の体幹運動を再現するロボットヘッド TORSO[1] と、Head Mounted Display(HMD) によって構成されている。このような HMD を用いたシステムにおいて、操作者の運動感覚と提示される視覚情報の間のずれが身体動揺や「映像酔い」と呼ばれる現象を引き起こすことが知られている。このため、操作者の頭部運動が提示される映像に遅れなく反映されることが望ましいが、通信を有するシステムにおいて、遅延を完全になくすことは困難である。TELESAR3 において通信系を組むために、これらの現象が引き起こされない遅延の許容範囲を明確にする必要がある。

これまで、遅延の影響に関する様々な評価が行われてきており [2]、一般に遅延を認識できる閾値は 100[ms] から 200[ms] だと言われている。しかし、TORSO は操作者の頭部運動への高速な追従が可能である一方、倒立振子の先端にステレオカメラが搭載されているような、不安定な系の制御が必要となるシステムである。そのため、一般に言われている遅延の許容範囲よりも条件が厳しくなる可能性がある。これまで、TORSO 系での評価も行ってきた [3] が、

システム全体の遅延での議論は行われなかった。

そこで本稿では、実験環境について検討を行ったうえで、システムに遅延を追加した場合の身体動揺の計測と遅延の認識に関する主観的評価を行う。その結果に加え、TELESAR3 システム、身体動揺の評価実験システムが有する遅延を測定することによって、TELESAR3 の通信系における通信遅延の許容範囲について検討する。

2. 評価の対象

TELESAR3 を用いて実験環境を構築すると、実験環境が複雑になってしまう。そこで、本稿での評価は TELESAR3 を用いた実空間ではなく、VR シミュレーション環境で行う。実験から得られる結果を、TELESAR3 での通信遅延の許容範囲の検討に用いるために、各システムが有する遅延の測定を行う。

遅延の許容範囲の評価指標は、文献 [3] と同様に、操作者の運動感覚と提示される視覚情報のずれによって誘発される身体動揺と、遅延を認識できるかどうかの主観評価で行う。身体動揺は重心の位置の動揺として見られることが知られているため、本稿でもそれに倣い、重心の位置を評価指標とする。

これら 2 つを評価指標として、2 種類の実験を行う。実験 1 では規則的な動作における身体動揺を評価する。規則的な動作を行う実験タスクにおいて、遅延の大きさと動作

の大きさ、微小動揺の大きさの間に正の相関があると予想している。実験 2 では実験タスクを不規則な動作として評価を行う。遅延によって動作が誘発、抑制されることにより、遅延が大きいほど平均パワー周波数が大きくなると予想している。

3. 実験環境

実験環境の構成を図 1 に示す。この環境に通信遅延に相当する遅延を追加し実験を行う。

評価は VR 環境で行った。VR 環境は OpenGL と Open Dynamics Engine(ODE) を用いて作成した。VR 環境には CG のロボットヘッドと被験者の動作の指標を設置した。TORSO と同じ 6 自由度を有するロボットヘッドが、被験者の頭部運動に追従し、被験者はロボットヘッドの視点位置に対応する VR 環境の映像を見ることになる。設置した指標については各実験の項で述べる。また、空間内座標はロボットヘッド前方に Y 軸、天頂方向に Z 軸とした右手座標系とした。

頭部の位置姿勢計測には実験 1 では ShootingStar 社製 ADL-1 を、実験 2 では小野電機社製の頭部位置計測システムを用いた。いずれもリンク機構を有する 6 自由度位置姿勢計測装置である。VR 環境の提示には HMD(水平画角 42[deg]、解像度 1024 × 768[pixel]、応答時間 30[ms]) を利用した。重心の計測にバランス Wii ボード (任天堂) を利用した。

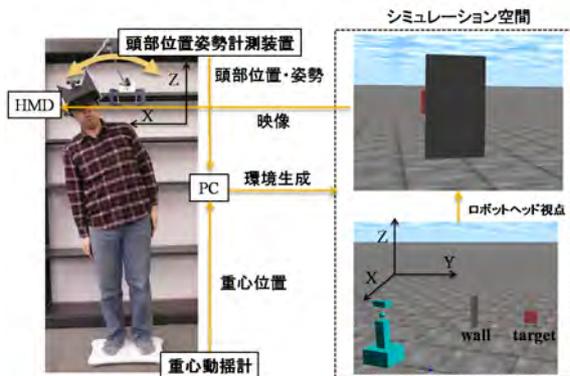


図 1: 通信遅延の許容範囲を求めるための実験環境

4. システムの有する遅延の測定

実験環境及び TELESAR3 頭部システムが有する遅延の測定を行った。各システムが有する遅延は、大まかに頭部位置姿勢計測部、映像生成部、映像描画部に分けられる。

頭部位置姿勢計測部の遅延は計測装置にエンコーダを取り付け、エンコーダの出力値と計測装置の出力値の相互相関から求めた。エンコーダは OMRON の E6H-C、エンコーダの出力値の取り込みには Interface の PCI-6205C を用いた。エンコーダの立ち上がり時間や PCI-6205C の取り込みにかかる時間は仕様書から、それぞれ 1[μs] 以下、250[ns] 以下と分かっている。エンコーダの出力値と頭部計測装置の出力値は 0.5[ms] 周期で記録した。遅延の平均値はそれぞ

れ、実験 1 で用いた ADL-1 で 6.63[ms]、実験 2 で用いた頭部位置計測システムで 3.12[ms]、TELESAR3 で用いるウェアラブルマスタ FST(Flexible Sensor Tube) で 11.6[ms] であった。

映像生成部の遅延は実験環境では VR 環境の生成に要する時間、TELESAR3 では TORSO の追従に要する時間とカメラの撮像周期となる。VR 環境の生成に要する時間はシミュレーションのループタイムから見積もることが出来る。TORSO の追従に要する時間は人間が無理なく動く範囲では 2[ms] 以下だと分かっている。また、カメラの撮像周期は 60[Hz] である。遅延の最大値は実験環境で 16[ms]、TELESAR3 で 19[ms] 程度であると見積もられる。

映像描画部では実験環境、TELESAR3 とともに同じ HMD を用いている。ディスプレイを一定の周期で点滅させている状態で、フォトダイオードからの電圧値をマイコンを用いてシリアル通信で PC に送り、ディスプレイの点滅と比較した。遅延の平均値は 26.2[ms] であった。

これらの測定結果より、実験環境が有する遅延は実験 1 で 49[ms] 程度、実験 2 で 45[ms] 程度、TELESAR3 頭部システムの有する遅延は 56[ms] 程度となる。

5. 実験 1: 規則的な動作における身体動揺の評価

5.1 実験手法

文献 [3] での評価実験と同様に、VR 環境に設置してある箱を、それを隠すように設置された壁の左右から交互に覗き込むように見るタスクを 30 秒間行った。

被験者は HMD を装着した状態でバランス Wii ボード上に足を自然に開いて立ち、メトロノーム 40[cpm] のリズムに合わせ壁の奥の箱を覗き込む。箱はロボットヘッドから 1.5[m] 前方に設置し、各辺の長さが 0.1[m] の立方体とした。箱を基準位置から視認できないように高さ 0.3[m]、幅が 0.17[m] の壁をロボットヘッドから 1[m] 前方に設置した。壁と箱の高さは、被験者が直立した際にロボットヘッドの正面にくるように設定した。このような位置関係では、左右に体を曲げる運動の振幅は 30cm 程度となる。被験者へは足をバランス Wii ボードから上げないこと、膝を出る限り曲げず腰から上を動かしてもらうこと、箱が少しでも見えれば十分であることを指示した。

システムに追加する遅延は 0, 25, 50, 100, 200[ms] の 5 種類とした。各遅延に対して 10 回の試行を行い、被験者ごとに計 50 回測定した。追加される遅延の順番はランダムである。重心の位置の計測データは、メトロノームで指示するリズムに動作を合わせるまでの時間を考慮し、最初の 5 秒間を除いた 25 秒間を分析に用いた。

各計測データから x 軸方向の位置の軌跡長 (以下、単に軌跡長とする) を求め、システムに追加する遅延が 0[ms] のときの平均値で正規化し、遅延間で比較を行った。

また、x 軸方向の位置に 0.24-0.38[Hz] の周波数成分をカットするフィルタを用いたものから分散 (以下、単に分散とする) を求め、軌跡長と同様の比較を行った。実験タスクでの

動作が 0.33[Hz] の動作であるので、その近傍の周波数成分を取り除くことにより、遅延によって誘発、抑制される微小な動揺を見ることができる。0.24-0.38[Hz] という範囲は予備実験により求めた。

遅延を認識できるかどうかについて評価するために、試行ごとに、(1) 遅れを感じない、(2) 遅れているような気がする、(3) 明らかに遅れを感じる、の 3 つの選択肢から 1 つを回答させた。

5.2 結果

遅延の認識に関する主観評価の結果を表 1 に示す。表 1 の値は、全被験者の回答の合計である。遅延 0[ms] に対して 25,50,100,200[ms] との間のカイ二乗検定を行ったところ、100,200[ms] で有意な差が見られた。ここでは有意水準を 5%としている。これらの結果より、遅延 50[ms] と 100[ms] の間に遅延を認識できる閾値があると考えられる。

表 1: 実験 1 における主観評価の回答

遅延 [ms]	(1)	(2)	(3)
0	30	10	0
25	32	6	2
50	27	12	1
100	6	20	14
200	0	3	37

次に重心の位置の軌跡長を遅延 0[ms] の平均値で正規化したものを図 2 に示す。エラーバーは標準偏差である。遅延 0[ms] に対する 25,50,100,200[ms] との間で t 検定を行い、有意水準 5%を有意な差があるとし「*」をグラフに記述した。遅延 0[ms] に対する軌跡長の有意な増大は遅延 50[ms] と 100[ms] で見られる。

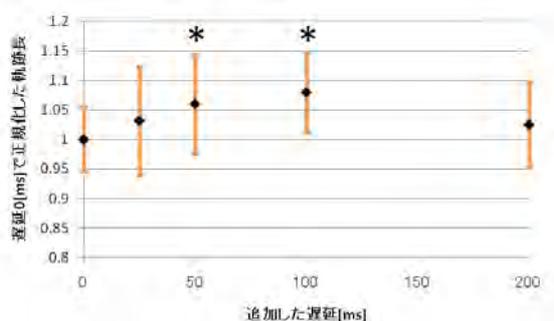


図 2: 実験 1 における重心の軌跡長

図 3 は重心位置の分散を遅延 0[ms] の平均値で正規化したものを示している。図中の記号は図 2 と同様である。遅延 0[ms] に対する分散の有意な増大は遅延 50[ms],100[ms] と 200[ms] で見られる。

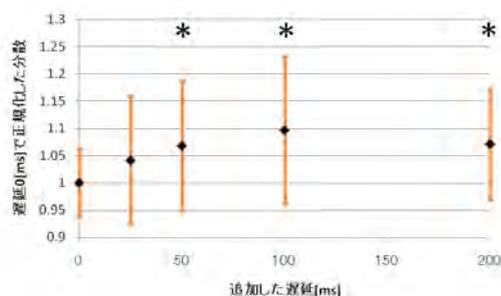


図 3: 実験 1 における重心の分散

6. 実験 2: 不規則な動作における身体動揺の評価

6.1 実験手法

実験 1 において、規則的な実験タスクが結果に影響を与えている可能性がある。そこで、被験者の動作の大きさ、動作のタイミングが不規則となるタスクを設定し評価を行った。

図 4 のように 2 本の棒を VR 空間に配置し、被験者には 2 本の棒が重なって見える位置に移動することを指示した。赤い棒はロボットヘッドの 2.0[m] 前方に固定されており、黒い棒はロボットヘッドから Y 軸方向に 1.0[m] の距離を保ちながら位置を変化させる。この位置の変化の範囲は X 軸方向に ± 0.10 [m] 以下であり、棒が重なって見える位置に被験者が 2~4[s] 留まると位置が変化する。黒い棒の位置の変化量、留まっていなければならない時間は位置の変化ごとにランダムに決定される。

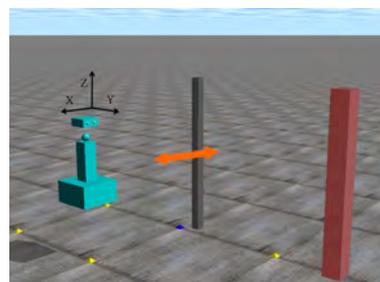


図 4: 実験 2 における指標の配置

システムに追加する遅延の種類、試行数、1 試行あたりの測定時間、遅延の認識に関する主観評価は実験 1 と同様とした。

身体動揺の評価は、x 軸方向の重心位置の平均パワー周波数を用いた。重心位置は直立時には 0.2[Hz] 以下の大きな周波数成分を持つことが知られているため、前処理としてカットオフ周波数が 0.2[Hz] のハイパスフィルタを作用させている。システムに追加する遅延が 0[ms] のときの平均値で正規化し、遅延間で比較を行った。

6.2 結果

遅延の認識に関する主観評価の結果を表 1 に示す。表 1 の値は、全被験者の回答の合計である。遅延 0[ms] に対して 25,50,100,200[ms] との間のカイ二乗検定を行ったところ、100,200[ms] で有意な差が見られた。ここでは有意水準を

5%としている。これらの結果より、遅延 50[ms] と 100[ms] の間に遅延を認識できる閾値があると考えられる。

表 2: 実験 2 における主観評価の回答

遅延 [ms]	(1)	(2)	(3)
0	18	10	2
25	22	5	3
50	17	110	3
100	8	12	10
200	1	6	23

次に重心の位置の平均パワー周波数を遅延 0[ms] の平均値で正規化したものを図 5 に示す。図中の記号は実験 1 と同様である。遅延 0[ms] に対して遅延 50[ms] と 100[ms] で有意な増大が、200[ms] で有意な減少が見られる。

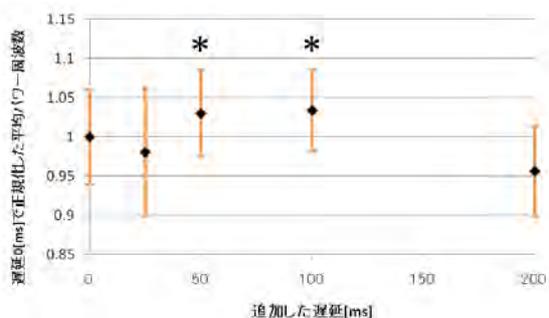


図 5: 実験 2 における平均パワー周波数

7. 考察

各実験の結果から、遅延を認識できる閾値よりも小さな遅延で身体動揺が誘発されることがわかる。そのため、遅延の許容範囲は身体動揺が誘発される遅延の範囲で議論すべきであると言える。本稿での実験において、システムに追加される遅延の大きさが 25[ms] と 50[ms] の間に身体動揺が誘発される閾値があること、実験環境の有する遅延が 49[ms] であることから、システム全体の遅延の許容範囲は 74[ms] 以下である。

TELESAR3 の頭部システムが有する遅延が最大で 56[ms] であるので、TELESAR3 の通信系において通信遅延は 18[ms] 以下に抑える必要がある。TELESAR3 がマスタスレーブ間で通信する情報の大部分は TORSO に搭載されているステレオカメラからの映像であり、これを 18[ms] 以下の遅延で通信することは十分に可能である。

遅延の認識に関する主観評価では実験 1,2 とともに、システムに追加される遅延の大きさが遅延 50[ms] と 100[ms] の間に遅延を認識できる閾値があると考えられる。各実験環境が有する遅延の大きさより、実験結果からは 99[ms] と 145[ms] の間に閾値があるといえる。これは一般に言われている遅延を認識できる閾値に近い値であり、妥当な結果が得られたと言える。

実験 1,2 とともに実験環境に追加された遅延が 50[ms],100[ms] で身体動揺が誘発されたが、200[ms] では異なる影響が見られた。表 1,2 から追加された遅延が 200[ms] の場合、大半の試行で明らかな遅延を認識していることが読み取れるが、この遅延の認識が身体動揺の結果に影響を与えていると思われる。実験 1 においては、被験者は提示される映像によって動くのではなく、予想した地点まで動くことを意識したために軌跡長 (図 2) で有意な増大が見られなかったのではないかと考えられる。実験 2 においては、遅延の認識によって動作が慎重になり高周波成分が減少したと考えられる。明らかな遅延により操作者の動作が抑制されるのであれば、素早い動作が困難なロボットのマスタスレーブにおいて、あえて提示される映像に遅延を追加することで操作者に素早い動作をさせないようにするといったことも考えられる。

8. まとめ

TELESAR3 の通信系における遅延の許容範囲を明らかにするために、本稿ではシステムに遅延を追加した場合の身体動揺の計測と遅延の認識に関する主観の評価を行った。その結果に加え、TELESAR3、実験環境が有する遅延を測定したことによって、TELESAR3 の通信系において、通信遅延が 18[ms] 以下通信系を組む必要がある。通信遅延が 18[ms] 以下の通信系を組むことは十分に可能であるので、実際に TELESAR3 での遠隔操作システムの構築を行いたいと考えている。

8. まとめ

謝辞 本研究の一部は JST-CREST「人間調和型情報技術」研究領域の支援によって行われた。

参考文献

- [1] Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi, "TORSO: Development of a telexistence visual system using a 6-d.o.f. robot head," *Advanced Robotics*, Vol.22, No.10, pp.1053-1073, 2008.
- [2] Robert S. Allison, Laurence R. Harris, Michael Jenkin, Urszula Jasiobedzka, James E. Zacher, "Tolerance of Temporal Delay in Virtual Environments," *vr*, pp.247, IEEE Virtual Reality Conference 2001 (VR 2001), 2001
- [3] 竹下 佳佑, 渡邊 孝一, 佐藤 克成, 南澤 孝太, 館 暉, "レイグジスタンスの研究 (第 62 報) TELESAR3 システムの遅延の評価," 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2010) 論文集, 1A1-F28 (2010)