

ト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—

Study of Telexistence(LXII) -Evaluation of Delay for TELESAR3-

○ 竹下 佳佑 (東大) 渡邊 孝一 (慶應大)
 佐藤 克成 (東大) 正 南澤 孝太 (東大)
正 舘 暲 (慶應大)

Keisuke TAKESHITA, the University of Tokyo, Keisuke_Takeshita@ipc.i.u-tokyo.ac.jp
Kouichi WATANABE, Keio University
Katsunari SATO, the University of Tokyo
Kouta MINAMIZAWA, the University of Tokyo
Susumu TACHI, Keio University

Abstract: In master-slave system, time delay between the human motion and display output is a large obstacle that induces postural sway of moving subjects. In this study, we investigated the relation between the threshold that subjects can recognize time delay and the threshold that subjects are influenced by time delay. We evaluated postural sway of moving subjects based on the center of gravity and head position. At the same time, the objective rating by the questionnaire to the subjects. The results suggest that the area of the delay with the influence on postural sway exists though the delay cannot be recognized for non-expert subjects.

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居るような高度な臨場感を操作者に与えることができる技術は、トレイグジスタンスと呼ばれている。これを実現するための手法の一つとして、操作者が操るマスタシステムと遠隔地に存在するスレーブロボットから構成されるマスタスレーブシステムが挙げられ、我々はトレイグジスタンス・マスタスレーブシステム TELESAR3[1]の開発を行っている。

TELESAR3 の頭部システムは首回転 3 自由度、腰回転 2 自由度、首並進 1 自由度をもち人の体幹運動を再現するロボットヘッド TORSO[2]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、操作者の頭部運動が描画出力に反映されるまでの遅延の影響が広く指摘されている。遅延は操作者の運動感覚と提示される視覚情報の間にずれをもたらし、身体動揺や「映像酔い」と呼ばれる現象を引き起こすと考えられている。

これまで、頭部を水平移動させた際の運動視や頭部回転による見まわし動作における、遅延の認識に関する評価が行われている[3][4]。これらの研究では、遅延が認識できるか否かを明らかにする点に注目しており、遅延による影響については述べていない。一方、運動感覚と視覚情報の間のずれによる影響に関する研究では、頭部を静止させた状態で視覚刺激を与えることによって誘発される身体動揺の評価が行われている[5]。しかし、頭部運動時の遅延による運動感覚と視覚情報のずれによる影響に関しては十分に調べられていない。遅延への対処をするにはこれらの影響を明らかにし、適切な手法を検討すべきである。

そこで、本研究では、遅延を認識できる範囲と遅延による影響がある範囲の関係を調べるために、頭部が運動している際の、遅延による運動感覚と視覚情報のずれから誘発される身体動揺の計測を行う。

2. 評価の対象

2.1 遅延による身体動揺

トレイグジスタンス・マスタスレーブシステムの頭部システムにおいて、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。しかし、文献[4]でも議論されているように、通信を有するシステムにおいて、遅延を完全になくすることは難しい。そのため、遅延の性質と影響を明らかにし、適切な対応をする必要がある。

システムに遅延が存在する場合、操作者の運動感覚と提示される視覚情報の間にずれが生じる。操作者の頭部が静止状態から運動状態に移行する際に、操作者は運動しているにも関わらず提示される映像は変化しないという現象が発生し、操作者の運動が妨げられる。また、操作者の頭部が運動状態から静止状態に移行する際に、操作者は静止しているにも関わらず提示される映像は動き続けることとなり、更なる運動が誘発される。このような操作者が意図していない視覚情報による運動の抑制、誘発が遅延による身体動揺の主な要因であると考えている。

システムの遅延が大きい場合、遅延による感覚と情報のずれを操作者が意識して操作を行うと考えられるため、上記の身体動揺は大きな問題とならないはずである。むしろ、問題となるのは操作者が遅延を認識できないにも関わらず、遅延による身体動揺が誘発されている場合である。遅延を認識していないため、操作者は自然な動作をしているつもりであっても、実際には体勢が崩れているという危険がある。マスタスレーブシステムにおいて、その崩れた姿勢にスレーブロボットは追従しようとするため、スレーブロボットに悪影響を与える可能性がある。

そのため、本稿では図 1 に示すように、システムの遅延を認識できないにも関わらず、遅延によって身体動揺が誘発される範囲が存在するかどうかを評価する。

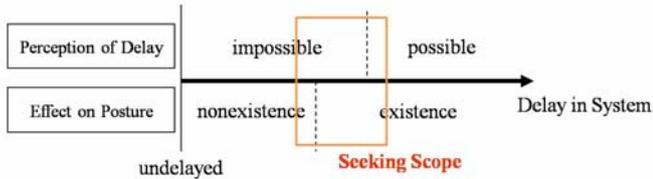


Fig. 1 Seeking scope of delay

2.2 対象とするシステム

本研究では TELESAR3 の構成要素である TORSO-HMD システムを想定して評価を行っている。TORSO の詳細については文献 [2] で述べられているが、操作者の頭部運動への高速な追従を可能とするために、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システムであるため、不安定な系の制御が必要となるシステムである。

遅延による身体動揺の影響により、操作者の動作が操作者の意図よりも大きくなる可能性が考えられる。意図よりも大きい動作の TORSO への入力により、動作が TORSO の可動範囲に収まらない、オーバーシュートが大きくなる、意図した動作に追従することに比べアクチュエータの出力が増加する等の不都合が発生する。また、操作者の姿勢が崩れ、頭部が振動しても TORSO は追従できるため、TORSO が振動してしまう。さらに、提示される視覚情報によって操作者の運動が抑制、誘発されるため、操作者の運動の速度が不均一となる。速度の急な変化は TORSO のアクチュエータへの負荷を増加させる。

よって、動作の大きさや速度の変化、頭部の揺れへの遅延の影響を調べる。

3. 実験環境

本章では、2章で示した遅延による頭部の運動の変化、身体動揺を評価するための実験環境について述べる。システムの構成を図2に示す。

評価は VR シミュレーション環境で行う。提示する VR 環境は OpenGL と Open Dynamics Engine (ODE) を用いて作成する。VR 環境には CG のロボットヘッドと被験者の動作の指標となる壁と箱が設置されている。ロボットヘッドは TORSO を模して作成されており、6 自由度を持つ。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 環境の映像をみる。箱はロボットヘッドから 1.5[m] 前方に設置されており、各辺の長さが 0.1[m] の立方体である。高さ 0.3[m]、幅が 0.17[m] の壁が、箱を基準位置から視認できないようにロボットヘッドから 1[m] 前方に設置されている。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する。VR 環境生成に用いた PC の性能は Xeon プロセッサ 3.2[GHz]、メモリ 2.0[GB] である。また、後の評価のために、空間内座標を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を定義する。

頭部の位置姿勢計測には 6 自由度リンク機構頭部計測装置 ADL-1 (サンプリングレート 400[Hz]) を用いる。VR 環境の提示には HMD (水平画角 42[deg]、解像度 1024×768[pixel]、リフレッシュレート 30[Hz]) を利用する。

また、重心の計測にバランス Wii ボード (任天堂) を用いる。バランス Wii ボードは四隅にひずみゲージを搭載している板状の計測装置であり、臨床の場で重心動揺計として機能する性能を持っている [6]。

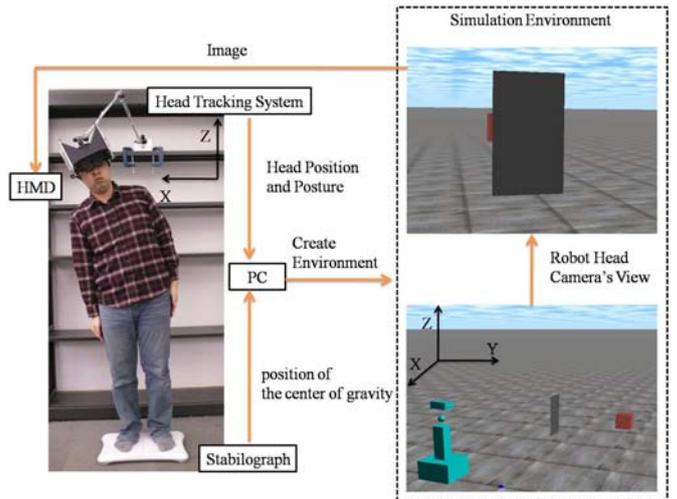


Fig. 2 Experiment environment

4. 実験方法

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、VR 環境に設置してある壁の奥の箱を壁の左右から交互に覗き込むように見るタスクを 30 秒間行う。壁と箱の大きさ、位置関係より、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する。

遅延は 0, 25, 50[ms] の 3 種類の遅延をシステムに追加する。追加する遅延に応じたループ数だけ前の頭部の位置姿勢情報を読み込むことで、遅延を作成する。各遅延に対して 10 回の試行を行い、被験者ごとに計 30 回測定する。追加される遅延の順番はランダムである。

遅延を認識できる遅延の大きさと遅延によって身体動揺が誘発される遅延の大きさを比較するために、遅延を認識できるかどうかについてアンケートによる主観的評価と、被験者の頭部位置と重心位置の計測データの分析による評価を行う。

遅延を認識できるかどうかについて評価するためのアンケートは試行ごとに行う。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 つの選択肢から答えてもらう。

頭部と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 秒間を分析に用いる。各計測データから x 軸方向の位置の標準偏差、軌跡長、パワースペクトルの和、パワースペクトルの高周波成分の全パワーに対する割合を求め、被験者ごとに遅延間の差を比較する。タスクが周期運動であるので、動作の大きさと標準偏差、軌跡長、パワースペクトルの和には相関がある。軌跡長は動作の大きさに関連するとともに、頭部の揺れが大きくなると増加する。速度の急な変化は周波数領域において高周波成分の増加となる。人の身体動揺は 0.1[Hz] 以下の大きな成分を持つことが知られているので、パワースペクトルを求める際にはカットオフ周波数を 0.1[Hz] とするハイパスフィルタをかける。また、ここでの高周波成分とは、実験タスクでの動作が 0.33[Hz] であることから 0.5[Hz] 以上の成分とする。

被験者は 3 名で、うち 1 名は HMD を装着した実験に慣れている熟練者であり、2 名は非熟練者である。

5. 結果と考察

遅延の認識に関するアンケートの結果を被験者ごとに表 1 に示す。また、被験者ごとに遅延が 0[ms]と 25[ms]、25[ms]と 50[ms]、0[ms]と 50[ms]の間でカイ二乗検定を行い、それぞれのカイ二乗値を表 2 に示す。有意水準 5%とすると、自由度 2 のカイ二乗値は 5.99 である。被験者 A は熟練者であり、被験者 B, C は非熟練者である。熟練者である被験者 A は遅延に敏感であり、表 2 より、0[ms]と 25[ms]の間に遅延を認識できる閾値があると予想される。被験者 B は 25[ms]近傍、被験者 C は 25[ms]と 50[ms]の間に閾値があると予想される。

Table 1 Questionnaire result

Subject A	①	②	③
Delay 0ms	9	1	0
Delay 25ms	1	3	6
Delay 50ms	1	1	8

Subject B	①	②	③
Delay 0ms	6	2	2
Delay 25ms	3	4	3
Delay 50ms	1	1	8

Subject C	①	②	③
Delay 0ms	10	0	0
Delay 25ms	9	0	1
Delay 50ms	3	0	7

Table 2 Chi-square test

	Subject A	Subject B	Subject C
Between delay 0ms and 25ms	13.40	1.87	1.05
Between delay 25ms and 50ms	1.29	5.07	7.50
Between delay 0ms and 50ms	14.40	7.50	10.77

次に頭部と重心の位置の計測データを分析したものを図 3～10 に示す。被験者ごとに遅延が 0[ms]と 25[ms]、0[ms]と 50[ms]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、有意水準 10%を傾向があるとして「*」をグラフに記述した。

図 3、4 はそれぞれ頭部の位置と重心の位置の x 軸方向の標準偏差を示したグラフである。全体として追加する遅延を大きくすると標準偏差が大きくなっている傾向が見取れる。ただ、統計学的有意差があるとは言い切れない。

図 5、6 はそれぞれ頭部と重心の x 軸方向の軌跡長を示したグラフである。熟練者である被験者 A においては遅延間の差がほとんど見られないが、非熟練者である被験者 B、C には標準偏差と同様の傾向が見られる。

図 7、8 はそれぞれ頭部と重心の x 軸方向のパワースペクトルの和を示したグラフである。全体的な傾向はこれまでと同様である。

図 9、10 はそれぞれ頭部と重心の x 軸方向のパワースペクトルの高周波成分の全パワーに対する割合を示したグラフである。これまでと違い、遅延間での差はほとんど見られない。

非熟練者である被験者 B の遅延を認識できる閾値は 25[ms]程度であると予想される。計測データの分析結果からは遅延が 0[ms]と 25, 50[ms]の間には差があるように思われる。これらから、被験者 B には遅延が認識できないが、姿勢に影響を与える遅延の範囲があると考えられる。また、被験者 C につ

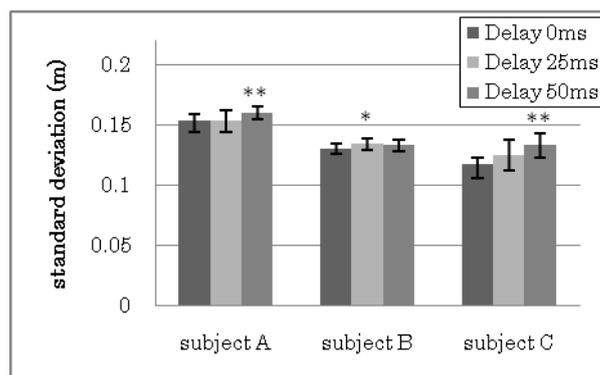


Fig. 3 Standard deviation of head position

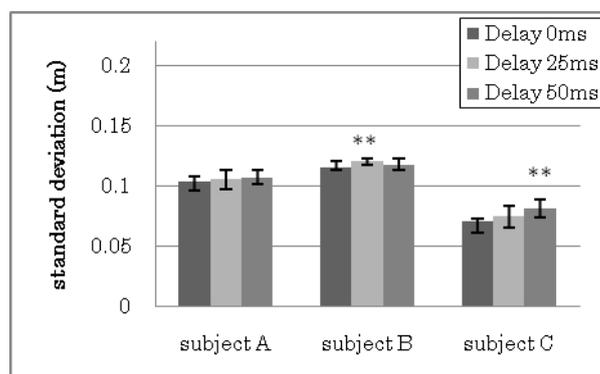


Fig. 4 Standard deviation of position of the center of gravity

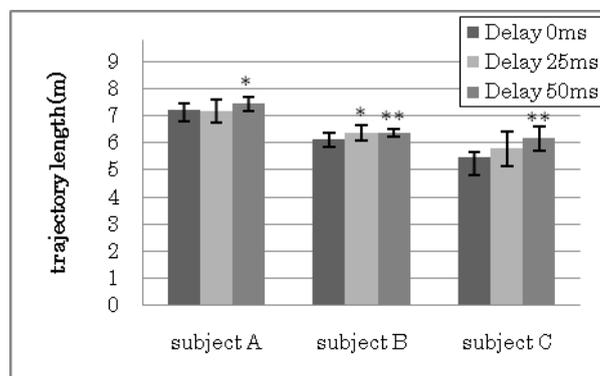


Fig. 5 Trajectory length of head position

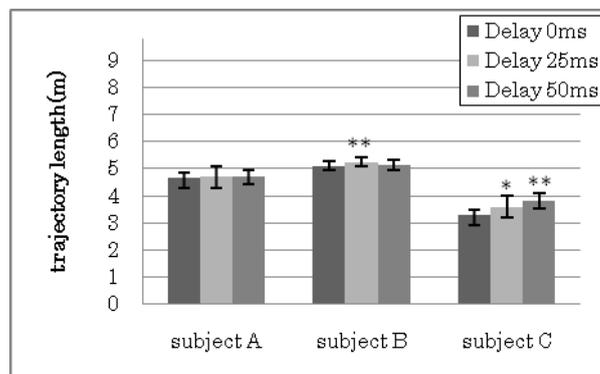


Fig. 6 Trajectory length of position of the center of gravity

いても、閾値は異なるが、同様の遅延の範囲があるように思われる。この範囲を調べるためには、追加する遅延の刻み幅をさらに小さくして実験を行う必要がある。

2.2 で述べた遅延による影響の可能性のうち、動作が大きくなることは標準偏差や軌跡長より確認できたが、パワースペクトルの高周波成分の全パワーに対する割合に遅延の大きさによる差はほとんど見られず、急な速度の変化は確認できなかった。0.5[Hz]以上を高周波成分としたが、この閾値に明確な根拠はなく、より細かく調べてみる必要がある。

熟練者である被験者 A には遅延による姿勢への影響がほとんど見られない。また、遅延の認識に関して非常に敏感であるため、被験者 B、C と異なり、遅延が姿勢に影響を与えないが、遅延を認識できる遅延の範囲があると考えられる。被験者 B、C との差異が熟練者か非熟練者かによる差であるか、被験者間の平衡機能の差であるかは、今回の被験者数では判断がつかない。判断を行うためには被験者数を増やすことが必要である。また、被験者間の平衡機能の差が本稿での実験結果の差に影響を与えている可能性があるため、重心動揺検査を行い、その結果と本稿での結果を比較する必要もある。

6. おわりに

トレイグジスタンス・マスタスレーブシステムにおいて、システムの遅延を完全になくすことは困難である。操作者が遅延を認識できないが、遅延によって身体動揺を誘発されている状態は好ましくない。そこで、本稿では、遅延を認識できる範囲と遅延による影響がある範囲の関係を調べるために、遅延による運動感覚と視覚情報のずれによる身体動揺を、頭部の位置と重心の位置を用いて評価した。

HMD を装着した実験の非熟練者において、遅延を認識できないが、姿勢に影響を与える遅延の範囲があることが示唆された。熟練者においては逆の結果となったが、これが熟練者と非熟練者間の差であるのか、個人差であるのかは今回の実験からでは判断することが出来ない。今後、さらなる検証を行うために、実験環境、実験方法を見直すとともに被験者数、試行数を増やす必要がある。

謝辞 本研究の一部は総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究推進事業(JST-CREST)の支援によって実施された。

文献

- [1] 渡邊孝一, 竹下佳佑, 佐藤克成, 南澤孝太, 館暲, “TELESAR3 システムの提案と構築 -トレイグジスタンスの研究 第 61 報-”, Robomec2010, 2010.
- [2] Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi, "TORISO: Development of a telexistence visual system using a 6-d.o.f. robot head", Advanced Robotics, Vol.22, No.10, pp.1053-1073, 2008.
- [3] 佐藤隆宣, 伴野明, 岸野文郎, “運動視における表示遅れの影響と高速画像生成表示方法”, テレビジョン学会誌, Vol.46, No.9, pp.1179-1188, 1992
- [4] 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
- [5] 中川肇, 古瀬正浩, 渡辺行雄, 袋谷賢吉, 林隆一, “視覚情報と身体動揺”, 第 17 回医療情報学連合大会, 3-F-1-3, 1997.
- [6] 川井田豊, 福留清博, 上嶋明, 西智洋, 松下寿史, “バランス Wii ボードの重心動揺計としての利用”, 第 44 回日本理学療法学会大会, P1-321, 2009

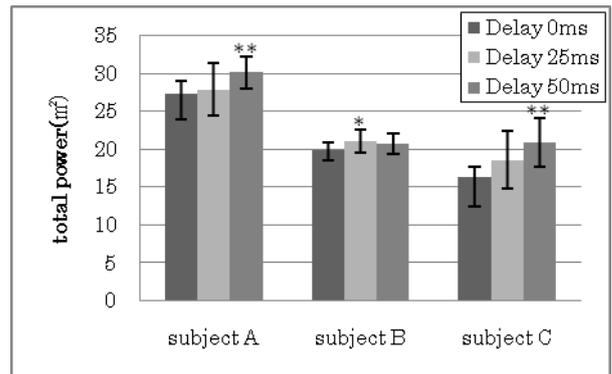


Fig. 7 Total power of head position

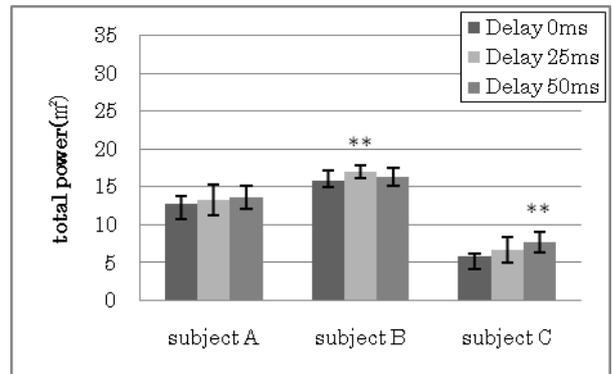


Fig. 8 Total power of position of center of gravity

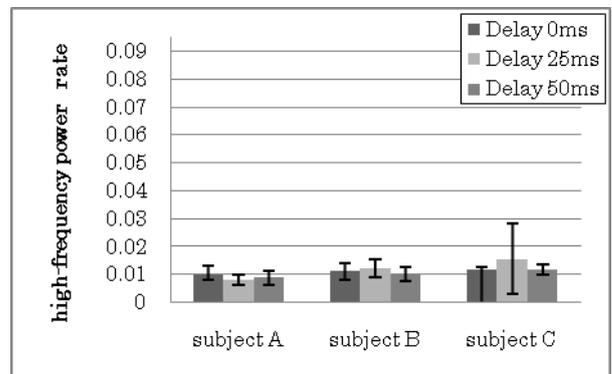


Fig. 9 High-frequency power rate of head position

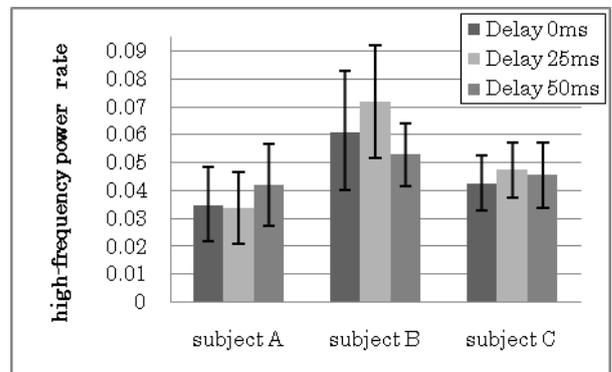


Fig. 10 High-frequency power rate of position of center of gravity