



低遅延化のための連続運動の利用法

Utilization of Continuous Motion for Delay Reduction

青戸 誠¹⁾, 宮本 拓¹⁾³⁾, 古川正紘¹⁾²⁾, 前田太郎¹⁾²⁾

Makoto AOTO, Hiroki MIYAMOTO, Masahiro FURUKAWA, Taro MAEDA

1) 大阪大学 大学院情報科学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4,
{makoto-aoto, hiroki-miyamoto, m.furukawa, t_maeda}@ist.osaka-u.ac.jp)

2) 脳情報通信融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-4)

3) 日本学術振興会 (JSPS) (〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1)

概要 : テレイグジスタンスの有効な運用には高い臨場感・没入感が必須である。このためには感覚運動情報の伝送遅延による臨場感の低下が課題であり、行動履歴からの運動予測系による時間補償が試みられている。本研究では、人の頭部運動への予測制御を課題とし、主動作課題と並列に連続動作可能な副課題を与えることによって、主課題の静止状態の継続によって生じる予測精度の低下を抑制することを試みる。

キーワード : テレプレゼンス, 遅延補償, 運動予測, 教示

1. はじめに

人体に危険性のある極限環境での作業を可能にする技術として、テレイグジスタンスマニピュレーションシステム(以下テレイグジスタンス)という遠隔操縦技術がある。これは臨場感伝送技術の一種であり、人間が感覚や身体動作をスレーブロボットと同期し、スレーブロボットが人の動きに追従することで、スレーブロボットに対して自己主体感が生起する。この技術によって、人は高い臨場感及び没入感を保ったまま、まるで自身が遠隔地に存在していると感じられる程に、直感的にロボットを操縦することができる。

テレイグジスタンスにおいて、臨場感を保ったまま物を掴んで動かすといった簡単な動作が実現されていることが報告されている。しかし、高速かつ精密な運動の再現を必要とする難度の高い作業においては、速度遅延及び時間遅延から臨場感を損なうという問題がある。この点を本研究では、人の高速な運動に追従が可能であるパラレルリンクアームを持つ産業用ロボットをテレイグジスタンスに用いて、ロボットの速度遅延を改善する。

また、時間遅延の観点からは、操縦者が躍度一定の条件下で頭部運動を行う場合、三次の多項式近似モデルを用いて頭部運動を予測することで、実質的な遅延の低減を試みる。この手法では線速度が 0 になる時刻を持つ運動においては予測誤差が大きいことが明らかになっている。予測誤差が大きい場合は、例えば、視対象物が実際の位置と違う場所にあるように感じ、物体を掴むなどのリーチングタスクにおいて自分の腕と物体の位置関係の把握が困難になるという問題が生じるため、テレイグジスタンスにおける重要な要素である臨場感を保証するこ

とができない。

そこで本研究では、予測を用いたテレイグジスタンス体験時に、連続運動を用いる追従タスクを行い、システムの周波数応答を改善する。

2. システムの時間遅延の補償

2.1 遅延による臨場感の低下

操縦者の頭部運動を制御対象に実時間で遅延なくかつ位置姿勢にかかる誤差なく再現させることは一般的に難しい。特に臨場感の維持には、操縦者の頭部運動の再現性の高さが重要であるが、システムが内包する時間遅れ要素が累積し、多くの場合、操縦者の頭部運動は時間遅れを伴って再現される。時間遅れを伴った運動を観察した操縦者は、操縦者の期待した運動が再現されないことで、操縦対象からの視覚フィードバックを通して得られる自己運動に対して、自己主体感を構築することが困難になる。これが臨場感を直接的に損なう主要因となる。一方で、操縦者と制御対象との間に、定常的な位置姿勢誤差が生じたとしても、必ずしも臨場感を損なう要因になるとは限らない。

これに対し一般的に、遅延時間に起因する時刻誤差に対する違和感は顕著であることから、遅延時間に伴う「同時性の破綻」が臨場感の喪失に対して支配的であるとみなせる。以上の論考から、操縦者は位置誤差と比して時刻差がもたらす速度誤差に対する検出感度がより高いといえる。

許容可能な時間遅延量の代表値として、次の事例が挙げられる。例えば運動立体視ディスプレイに着目すると、5[m]前方での奥行差 50[mm]の弁別を要求精度としたとき、許容される遅延は 82[ms]であることが分かっている[4]。

2.2 多項式近似モデルによる運動予測

人の頭部のような大きな質量をもつ部位は、短時間で躍度の大幅な変化は生じにくく、躍度が一定にみなせると仮定する。この場合、ある短時間における過去にサンプリングされた位置姿勢時系列データを参照し、未来の人の頭部位置を外挿する予測モデルを多項式近似モデルとした。これにより、追従動作中に過去に得られた頭部位置姿勢を用いて未来時刻における頭部位置姿勢をスレーブロボットに伝送することで、時間遅延による位置姿勢誤差が補償されることを期待する。

3. 追従実験

3.1 実験装置

本研究では、FANUC M-1iA/0.5AL(FANUC)を基盤としたトレイグスタンスロボットを構築した(図1)。

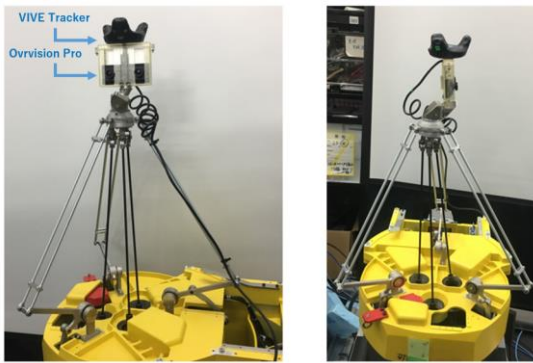


図 1: トレイグロボットの概観

FANUC は 6 軸の屈曲型のパラレルリンク機構を有する産業用ロボットである。屈曲型パラレルリンクは、可動部の質量が小さく高速動作が可能であるという特徴を持ち、人が作業するときの頭部運動に追従するのに十分な速度で目標位置に到達できることから、本研究のスレーブロボットの基盤として採用した。このスレーブロボットのエンドエフェクタ部に操縦者に提示される実映像を取得するためのカメラが Ovrvision Pro(WIZAPPLY)が固定されている。マスタ装置には HMD である VIVE Pro(HTC)を用いた。これによって、スレーブロボットからの映像を操縦者に提示し、制御入力である操縦者の頭部位置や姿勢を計測する。ただし、システムの時間遅延は 333ms、制御対象の制御周期とデータのサンプリング周期はともに 34ms である。

3.2 実験

本実験では、前述の実システムが有する時間遅延を VR 空間内で再現することで、遅延の有無による運動特性の定量化ならびに遅延補償の定量的な効果を測定した。

実験概略を図 2 に示す。人の頭部の運動が HMD 内の映像に反映されるまでの間の遅延時間 330ms としたトレイグスタンス環境を VR 空間内に構築した。被験者は追従対象となる赤丸に対して、自身の頭部運動に従属的に動く眼前の白丸を追従させるよう教示された。

多項式近似モデルによる追従特性の改善を評価するために、目標位置入力 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ に従って VR 空間内で 2

次元平面運動する追従対象を、HMD の中心に描画される制御対象で追従する実験を行った。

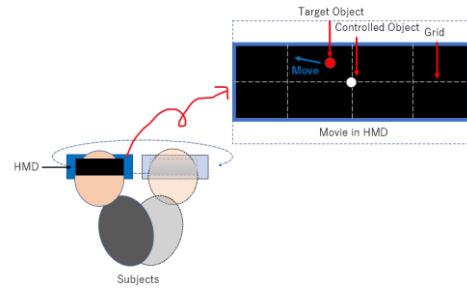


図 2: 実験概観

ここで $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ は以下の式で定義される疑似ランダム信号を用いる。

$$x_1(t) = \sum_{k=1}^n a_0 p^{-k-1} \sin(2\pi f_0 p^{k+1} t + \varphi_{1k}) \quad (1)$$

$$x_2(t) = \sum_{k=1}^n a_0 p^{-k-1} \sin(2\pi f_0 p^{k+1} t + \varphi_{2k}) \quad (2)$$

ただし、 $p = 1.736$ 、 $n = 6$ 、 $f_0 = 0.125$ 、 φ_{1k} 、 φ_{2k} は乱数とする。また乱数は再現性が担保されるように全 5 試行毎に用いる 5 系列を予め用意した。つまり入力信号は各 5 系列の異なった運動を表し、かつ線速度が 0 になる時刻がないように設計されている。

遅延時間条件下では被験者の頭部運動が、

- (i) 遅延なし遅延補償無し(no delay-no prediction : nd-np 条件)
 - (ii) 遅延 330ms で運動予測による遅延補償無し(d-np 条件)
 - (iii) 遅延 330ms かつ 330ms の遅延補償あり(d-p 条件)
- の 3 条件で 5 系列の入力信号に対して追従タスクを図 3 のようなシステムで行った。

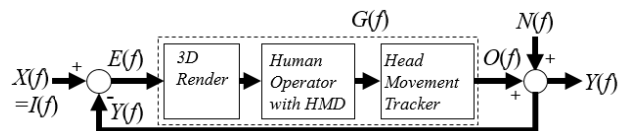


図 3: 追従系のブロックダイアグラム

多項式近似式による遅延保証の可能性について示すために nd-np 条件における頭部軌道と、d-np 条件、d-p 条件における頭部軌道の時間相関を取り、可視化したものが図 4 である。図 4 の下のグラフから nd-np 条件と d-p 条件の頭部軌道の時間相関のピークと、nd-np 条件と d-np 条件の頭部軌道の時間相関のピークがそれぞれ 283.3ms、50ms に存在することから、多項式近似モデルによって未来の頭部位置を外挿することが可能であることが示された。

また、追従タスク時の 5 系列の内の 1 系列である入力信号 $x_1(t)$ に対する、nd-np、d-np、d-p 条件の全 3 条件における出力信号 $y_1(t)$ をプロットしたものが図 5 である。

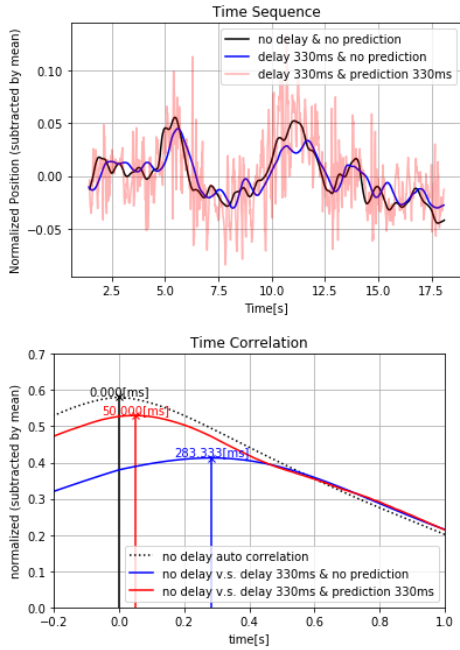


図 4: 各条件の頭部軌道と
nd-np 条件に対する d-np 条件, d-p 条件の時間相関

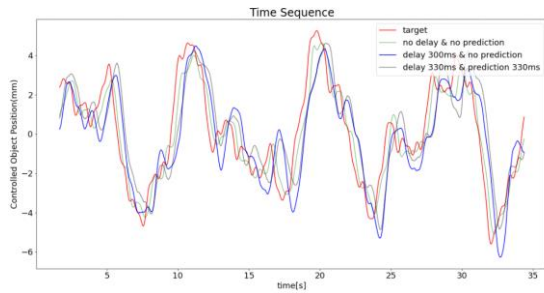


図 5: 各条件における, 入力信号と出力信号

この時, 1024 点のサンプリング結果を用いて, 入力信号のパワースペクトルと入力信号とエラーのクロススペクトルの比から操縦者を含んだ制御対象のシステム関数 $T(f)$ を推定することができる。

オペレータを含んだ提示・操作系の開ループ特性 $G(f)$ を図 3 のように定める。この系の閉ループ特性を $T(f)$ とすると, 評価すべき開ループ特性 $G(f)$ は次式を用いて導出できる[3]。

$$G(f) = \frac{T(f)}{1 - T(f)} \quad (2)$$

本稿では後述するように, 開ループ特性 $G(f)$ を McRuer のクロスオーバーモデルを用いて解析を行う。この解析において当該変換式は, 直接推定が可能な閉ループ特性 $T(f)$ を用いて, 本来求めたいが直接推定は困難である開ループ特性 $G(f)$ を導出するために用いている。

開ループ特性 $T(f)$ は入出力信号 $i(t)$, $o(t)$ のフーリエ変換 $I(f)$, $O(f)$ を用いて次式のように定義される。

$$T(f) \equiv O(f)/I(f) \quad (3)$$

さらに, 系への入力信号のパワースペクトル Φ_{II} 及び入力信号と出力信号のクロススペクトル Φ_{IO} を用いて, 前記

式は次式のように表せる[3]。

$$\frac{O(f)}{I(f)} = \frac{\Phi_{IO}}{\Phi_{II}} \quad (4)$$

ここで, 図 3 の $N(f)$ に示すような雑音を考える。この雑音 $N(f)$ は, 入力信号系列 $I(f)$ に無相関と考える。前式の「入力信号のパワースペクトル Φ_{II} 及び入力信号と出力信号のクロススペクトル Φ_{IO} の比」を閉ループ特性 $T(f)$ とみなすことは, 次の工夫をすることで系に混入する雑音への頑健性を担保する。

工夫とはすなわち前式のスペクトル $I(f)$, $O(f)$ のアンサンブル平均をとる操作にあり, 次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{IO} &= E[I(f)*O(f)] \\ \Phi_{II} &= E[I(f)*I(f)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

*は複素共役, $E[]$ はアンサンブル平均を表す。直接計測可能なパラメータ $x(t)$, $y(t)$ のフーリエ変換 $X(f)$, $Y(f)$ は, $y(t)$ が雑音成分 $n(t)$ を含むことから,

$$\left. \begin{aligned} X(f) &= I(f) \\ Y(f) &= O(f) + N(f) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。しかし雑音成分 $N(f)$ は入力 $I(f)$ と無相関であると仮定したため, アンサンブル平均を用いて入力信号と雑音とのクロススペクトルを求めると,

$$\Phi_{IN} = E[I(f)*N(f)] = 0 \quad (7)$$

を得る。以上の導出から, 直接計測可能なパラメータ $X(f)$, $Y(f)$ を用いて入力信号のパワースペクトル Φ_{xx} と入力信号のクロススペクトル Φ_{xy} を求めると式(6)(7)より

$$\Phi_{xx} = E[X(f)*X(f)] = E[I(f)*I(f)] = \Phi_{II} \quad (8)$$

$$\Phi_{xy} = E[X(f)*Y(f)] = E[I(f)*\{O(f) + N(f)\}]$$

$$= \Phi_{IO} + \Phi_{IN} = \Phi_{IO} \quad (9) =$$

$E[I(f)*\{O(f) + N(f)\}]$ から閉ループ特性 $T(f)$ は次のように求まる。

$$T(f) = \frac{\Phi_{xy}}{\Phi_{xx}} = \frac{E[X(f)*Y(f)]}{E[X(f)*X(f)]} \quad (10)$$

解析には, 1024 点のサンプリング結果のフーリエ変換から $X(f) = I(f)$, $Y(f) = O(f) + N(f)$ を求め, これらのクロススペクトル, パワースペクトルのアンサンブル平均をそれぞれ Φ_{xy} , Φ_{xx} とする。

McRuer らは, ヒトが介在する閉ループ伝達関数内のオペレータの特性が, 入力信号に対して線形に相関性を持つことを指摘し, オペレータ Y_p と制御対象 Y_c の特性の積である開ループ伝達関数 $Y_{OL}(j\omega)$ が次式で示される準線形伝達関数(Quasi-Linear Transfer Function)に近似可能であると指摘している[5]。

$$Y_{OL}(j\omega) = Y_p Y_c \cong \frac{\omega_c e^{-j\omega\tau_e}}{j\omega}; \text{ near } \omega_c \quad (11)$$

このモデルは, McRuer のクロスオーバーモデルと呼ばれ, 系の開ループ伝達特性がクロスオーバー周波数 $f_c (= 2\pi\omega_c)$ と等価時間遅れ τ_e の 2 値のみで表現できる利点がある。

本実験における開ループ伝達関数 $Y_{OL}(j\omega)$ は, 式(2)で導出される開ループ伝達関数 $G(f)$ である。そこで開ループ伝達関数 $G(f)$ を McRuer のクロスオーバーモデルにあてはめ,

クロスオーバー周波数 f_c と等価時間遅れ τ_e によってその特性を評価した。

疑似ランダム信号の運動方向に対応する制御対象の運動成分を、それぞれ出力信号 $y_1(t), y_2(t)$ とした。開ループ伝達関数 $G(f)$ の周波数応答の一部をプロットしたものが図7の青点である。青点付近のエラーバーはまた、赤線はクロスオーバーモデルにあてはめた開ループ伝達関数 $G(f)$ であり、ゲイン1付近のプロットに対し最小二乗法を用いてあてはめた。この関数とゲイン1の交点がクロスオーバー周波数 f_c であり、システムの位相遅れ P_c である。このとき、システムの時間遅延 τ は、

$$\tau = \frac{P_c}{2\pi f_c} \quad (12)$$

で与えられる。

これらの信号から3条件における、システムの伝達関数を求めたものが図6であり、図7は横軸に τ 、縦軸に f_c を取って、3条件のシステムを評価している。このグラフは左上に行くほどシステムの追従性能が高いことを示している。

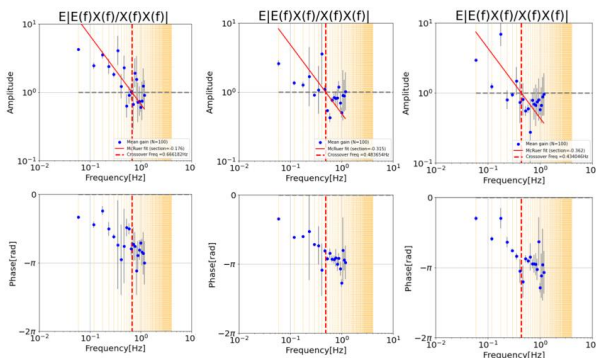


図7:nd-np条件,d-np条件,d-p条件における、伝達関数

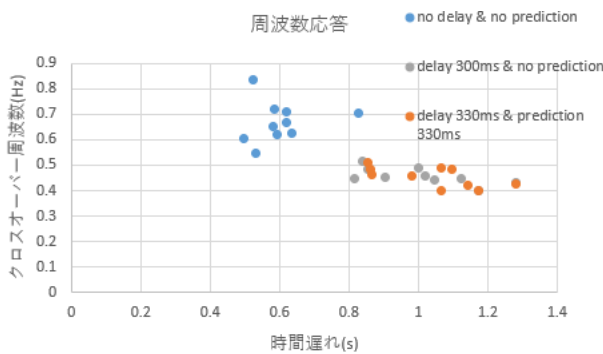


図7:各におけるシステムの周波数応答

nd-np, d-np, d-p条件の全3条件で、5パターンの入力信号に対してそれぞれクロスオーバー周波数と時間遅れを用いたものなので、入力信号による結果を次式に示す指標を用いて平均化した。

$$EV(i) = 2\pi f_c + \frac{1}{\tau} \quad (13)$$

ここで i は信号式のパターンを指し、 $EV(1)$ で規格化した

平均データを図8に示す。

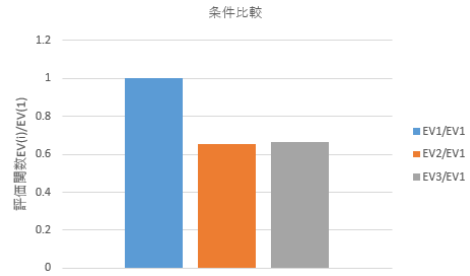


図8:システムの比較結果

これによって、多項式近似による遅延保証を用いることで遅延のあるシステムの追従特性の改善を示すことができた。

4. むすび

本稿では、VR空間において遅延がない条件と遅延があり予測を用いた時の追従タスク時の頭部軌道の時間相関を取ることで、提案手法である多項式近似モデルによる遅延保証が可能であることを示した。また、追従タスク時の周波数特性を評価することで、システムの改善を認めることができ、トレイグジスタンスにおける連続運動による追従タスク時の遅延保証の可能性を示すことができた。一方で、本実験における追従対象の二つの運動成分が同時に0になるような時刻が存在する場合における予測可能性は示しておらず、過去データを参照し頭部位置を外挿するモデルであるため、予測精度の低下が考えられる。なので、今後の展望として、運動が静止する予兆を捉えることができるシステムを設計し、別の予測モデルに切り替えることで予測精度の低減を避けることができるのではないかと考える。

参考文献

- [1] M. M. Rahman, R. Ikeuraand, K. Mizutani : Investigating the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Human Operators.
- [2] 舘 暉,安田 賢一: テレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価, 電気学会論文誌 C 編, Vol.115-C, No.2, pp.172-181 (1995.2)
- [3] 前田 太郎, 荒井 裕彦, 舘 暉: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.5, pp.99-109 (1992.9)
- [4] 近藤大祐, 倉鋪圭太, 小池達也, 深野 亮, 吉灘 裕, 谷本貴頌, 遠隔操作のための運動立体視システムにおける表示遅れの影響の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2P1-P06
- [5] Duane T. McRuer, Henry R. Jex, A Review of Quasi-Liner Pilot Models, Trans. On Human Factors in Electronics, Vol HFE-8, No.3, 1967