

3軸ステージを用いた非接触搬送における垂直方向の動作に対する制御手法 の検討

三谷祐一朗*¹

Investigation of the Magnetic Levitation Control Method to the Vertical Direction of the Non-contact Conveyance System Using Three-axis Stage

MITANI Yuuichiroh*¹

Abstract: The vertical movement of the non-contact conveyance system can be controlled by adding another signal to the magnetic levitation control input signal. The goal of the non-contact conveyance system is to convey an assembly part or an industrial product in a three-dimensional space without grasping of the object by a chuck or a robot hand. The control of the horizontal movement was achieved successfully with a combination of the PID and robust controller designed by the FNFR (Finite Number Frequency Response) modeling method. In this study, three kinds of design methods are investigated to control the vertical movement of the three-axis stage to move the levitation object upward without destabilization of the levitation system. The first design method is MPC (Model Predictive Control) which is increasingly applied to industrial manufacturing systems because of the usability. MPC can be designed with constrained conditions explicitly. Moreover, the way to stabilize the magnetic levitation unstable system is interesting. The second design method also applies MPC to the stabilized system by the PID controller as a comparison of the first design method. The third method is the cancellation of the vertical motion using an adaptive inverse controller. The effectiveness of all three methods is shown through the simulation results.

Key Words: Magnetic levitation, Non-contact conveyance, PID control, Model predictive control, Filtered- ϵ LMS algorithm

1. 緒言

工業界における人手不足は深刻であり、今後ますます生産工程の自動化が進むと思われる。それに付随するように、生産設備として必須の PLC (Programmable Logic Controller) は高速、高機能化しており、従来の PLC では対処できなかった複雑な制御系を高速に処理できるようになった。例えば、生産ラインにおけるアライメント等に利用される、直交3軸ステージにおいて、オムロン株式会社（以下、オムロンと称す）の新型 PLC である Sysmac NJ と AC サーボモータ 1S シリーズを組み合わせれば、およそ 10nm の精度で位置決めが可能である。本研究では、それらの制御機器を用い、電磁石による非接触搬送における、垂直方向の安定駆動のための制御系設計方法について検討する。

本研究で用いる 3 軸ステージは、2016 年度にオムロン社員より製作依頼され、沼津高専にて設計、製作したものである。画像処理を伴う 3 軸ステージによるアライメント制御系

構築のための技術者教育が、オムロン社内で活発に行われており、そのための新しい制御装置として製作を依頼された。それまでもオムロン社内で 3 軸ステージを利用した教育はなされていたが、その際に用いられていた機材は、大人が二人がかりでやっと運べる大がかりなものであり、コンパクト化が強く望まれていた。いくつかの設計仕様が提示され、製作した 3 軸ステージは、動作の精度を向上させつつ、一人で運搬可能なコンパクトなものとなった。

製作当初は、垂直駆動軸 (Z 軸) にチャックを取り付け、従来のアライメントを想定した装置とした。2017 年度、それを改良し、Z 軸に変位センサ内包型電磁石を取り付けることで、非接触搬送装置に拡張した^[1]。そして 2019 年度、PID 制御により安定化した浮上系に対し、FNFR (Finite Number Frequency Response) モデルを利用したロボast制御系を構築することで、短時間で浮上物体の揺れを抑えた水平方向の搬送制御を確立した^[2]。本研究では、垂直方向の搬送を安定に制御するために、2 種類の制御器を用いることを検討する。一つ目として、MPC (Model Predictive Control) を利用

*1 機械工学科 Department of Mechanical Engineering

する。MPC は、PID 制御と同等の設計の容易さを持ちながら、ハードウェアにおける制約条件を陽に考慮して設計でき、近年工業界にて応用例が広まりつつある。二つ目として、外乱のキャンセレーションが可能な適応逆制御 (Adaptive Inverse Control) を用いる。3 軸ステージの Z 軸の動作を、浮上系における外乱と見なし、逆モデルによるキャンセレーションを行う。MATLAB®/Simulink®を用いて設計し、シミュレーションによりそれぞれの制御系の有効性を確認する。

2. 磁気浮上系のモデル

図 1 に、磁気浮上系のモデル図を示す。ある位置を浮上物体の変位 $x = 0$ とし、その位置から上方向を正に取る。

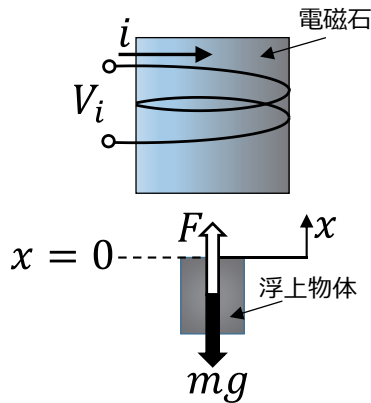


図 1 磁気浮上系のモデル

電磁石に入力電圧 V_i を印加した時に流れる電流を i 、浮上物体が電磁石から受ける力を F 、浮上物体に作用する重力を mg とすると、運動方程式は以下のように書ける。

$$m\ddot{x} = F - mg \quad (1)$$

$$F = k \left(\frac{i}{X-x} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 k および X は、電磁石および浮上物体により決まる定数であり、 F と i を実測することによって得られる。本報では適当な値を定め、シミュレーションによる制御性能の検証のみ行うとする。

3. 制御器の設計

3 軸直行ステージの Z 軸を、2.5 秒かけて 100mm 上方向へ動作させることを想定し、制御器の設計を行った。設計方法は、以下の 3 通りとした。

- ① MPC のみ用いて安定化する。
- ② PID 制御にて安定化した系に対して、MPC を用いる。
- ③ PID 制御にて安定化した系に対して、適応逆制御を用いる。

サンプリングタイムを含め、制御パラメータの多くは、試行

錯誤にて求めた。以下に、それぞれの詳細について述べる。

3. 1 MPCによる制御系

不安定系に対する MPC の設計例として、MathWorks のホームページにある倒立振り子における制御系設計例 (Control of an Inverted Pendulum on a Cart) を参照した⁴⁾。制御対象を P、コントローラを MPC とし、図 2 にブロック線図を示す。制御対象には、目標位置での浮上に必要なバイアス電流を加える。また、ステージの Z 軸の動作を外乱と見なす。

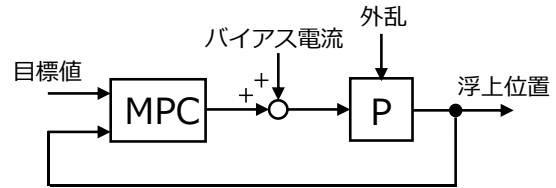


図 2 MPC ブロック線図

まず、式(1)、(2)で表される不安定な浮上系に対して、Simulink Control Design™ のコマンド `linio` および `linearize` を用いて線形化した系を作成した。MPC を設計する際に、最も重要となるパラメータ、予測ホライズンおよび制御ホライズンはそれぞれ、200、5 と与えた。文献[3]に習い、表 1 に示す設計パラメータを用いた。なお、各パラメータの冒頭に記載した `mpcobj` は、コマンド `mpc` より生成される MPC オブジェクトである。

表 1 MPC 設計パラメータ

<code>mpcobj.MV.Min</code>	操作量の最小値
<code>mpcobj.MV.Max</code>	操作量の最大値
<code>mpcobj.MV.ScaleFactor</code>	操作量に対する重み
<code>mpcobj.Weights.MVRate</code>	操作量の変化率に対する重み
<code>mpcobj.Weights.OV</code>	制御量に対する重み

設計パラメータは、試行錯誤により以下のように決定した。なおここでは、操作量の最大および最小値は制限せず、`Inf` (無限大) とした。

$$\text{mpcobj.MV.Min} = -\text{Inf}, \quad \text{mpcobj.MV.Max} = \text{Inf}$$

$$\text{mpcobj.MV.ScaleFactor} = 1500$$

$$\text{mpcobj.Weights.MVRate} = 100$$

$$\text{mpcobj.Weights.OV} = 100$$

また、外乱モデルを構築し、その際の設定パラメータは、以下のように文献[3]と同一値とした。

$$\text{disturbance_model} = \text{getindist}(\text{mpcobj})$$

$$\text{setindist}(\text{mpcobj}, 'model', \text{disturbance_model} * 10)$$

$$\text{disturbance_model} = \text{getoutdist}(\text{mpcobj})$$

setoutdist(mpcobj0, 'model', disturbance_model*10)

Model Predictive Control Toolbox™ のコマンド MPC を用いた設計後の, review コマンドによるレビュー結果を図 3 に示す. OP Hessian Matrix Validity の警告は, 設計パラメータの調整で解消できるようだが, 現時点で解決できていない.

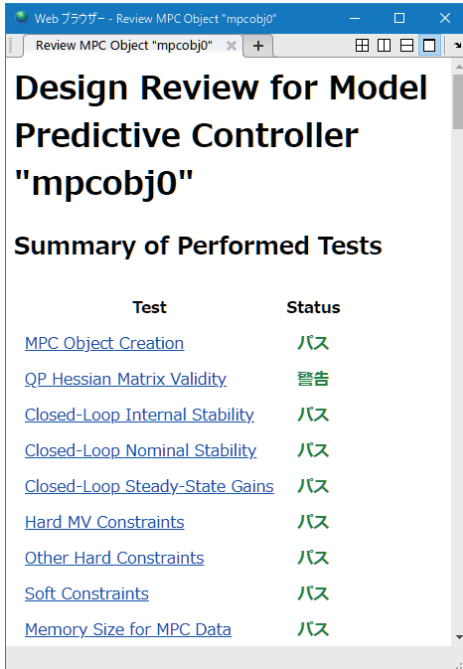
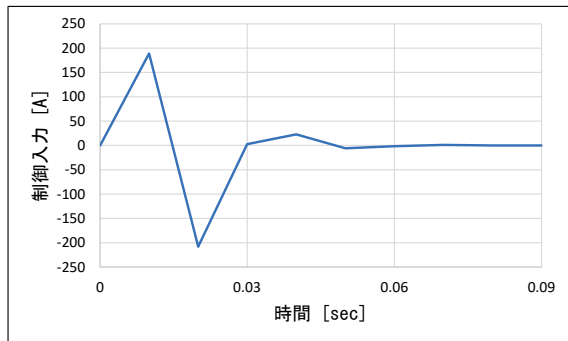
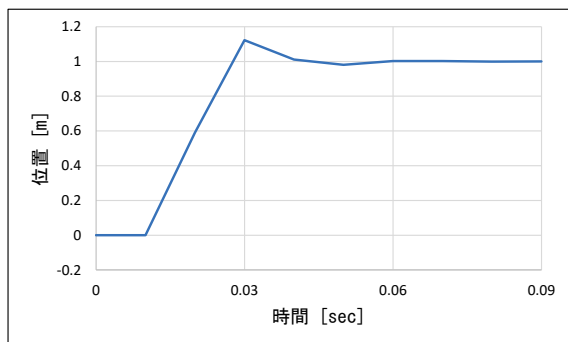


図 3 MPC 設計レビュー結果



(a) 制御入力



(b) 位置

図 4 MPC 設計結果

図 4 に, 設計したコントローラを用いた, 閉ループ系のステップ応答を示す. サンプルタイムは 0.01[sec]である. 安定化することはできたものの, 現状では, MPC のサンプルタイムを他の制御手法より長く取らなければ, 浮上に至らない. また, 目標位置に浮上させるために必要なバイアス電流を加えている関係で, 制御入力はゼロに収束している. MPC による倒立制御を参考とした結果であるが, 本来 MPC は, この場合には不要な定常偏差を埋めるための積分特性を持っており, 設計結果の安定余裕の確認が必要であると思われる.

3. 2 安定化した系に対する MPC による制御系

次に, PID 制御により安定化した浮上系に対して MPC を設計した. 制御ブロック線図を図 5 に示す. 記号の意味は図 2 と同様であり, PID は, 浮上系を安定化するための PID 制御器を表す.

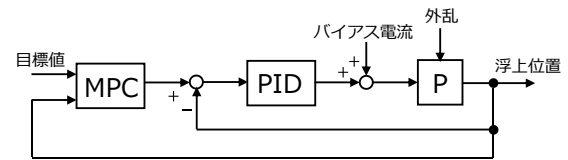


図 5 PID・MPC ブロック線図

この場合も 3. 1 と同様の手法を用いて, まずは系を線形化し, 予測ホライズン, 制御ホライズンをそれぞれ, 50, 5 と設定した. また, 外乱モデルも構築したが, ここでは外乱の影響を 3. 1 の場合の 5 倍に設定した. 以下に, 試行錯誤により決定した設計パラメータを示す.

```

mpcobj.MV.Min = -Inf, mpcobj0.MV.Max = Inf
mpcobj.MV.ScaleFactor = 1
mpcobj.Weights.MVRate = 10
mpcobj.Weights.OV = 1
disturbance_model = getindist( mpcobj )
setindist( mpcobj, 'model', disturbance_model*50 )
disturbance_model = getoutdist( mpcobj )
setoutdist( mpcobj, 'model', disturbance_model*50 )

```

以上の設定値を用いて MPC を設計した際の, レビュー結果を図 6 に示す. ここでは, すべて「パス」となり, 設計上の警告はなかった.

図 7 に, 設計したコントローラを用いた, 閉ループ系のステップ応答を示す. サンプルタイムは 1[msec]である. 浮上位置は, およそ 0.1 秒で 1 に収束していることが分かる. また, この時の制御入力値は, 内側の PID ループの目標値であるが, bias に含まれるわずかな誤差が, 制御入力の, 1 からのずれになって表れたと思われる.

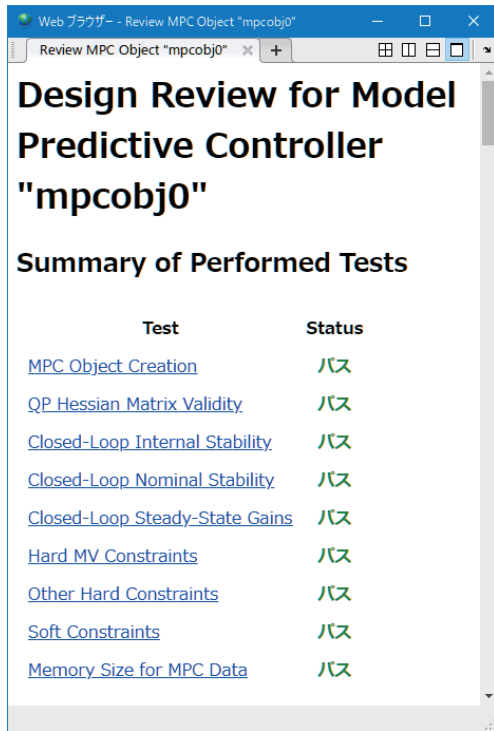
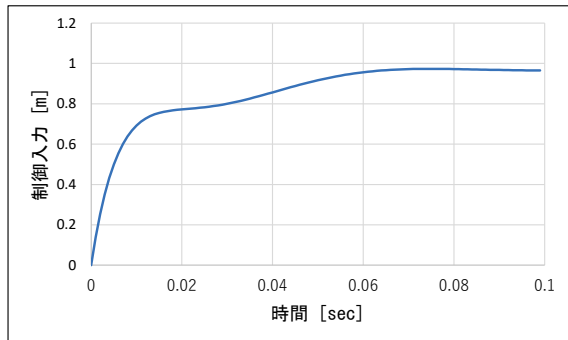
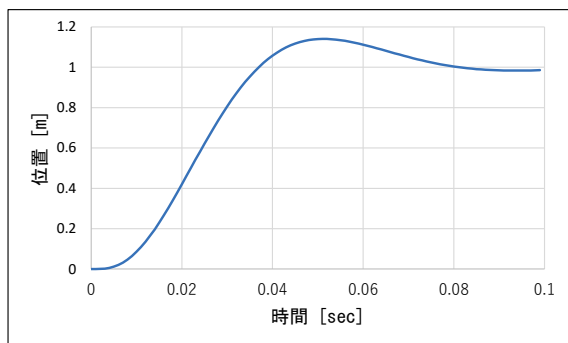


図 6 MPC 設計レビュー結果



(a) 制御入力



(b) 位置

図 7 MPC 設計結果

3. 3 適応逆制御による制御系

ここで用いた適応アルゴリズムは、ウィナーフィルタと呼ばれる、Z 変換を用いた FIR (Finite Impulse Response) モ

デルに対して、LMS (Least Mean Squares) アルゴリズムにより逐次的にモデリングを行う手法である^[4]。ここでは、多入力多出力系にも拡張できる、Filtered- ϵ LMS アルゴリズムを用いた。図 8 に、制御ブロック線図を示す。PID 制御により、目標位置に浮上する系に対して、Z 軸による垂直方向の動作により電磁石が移動する際、その運動は Z 軸のサーボドライバより取得できる。したがって、適応逆制御を応用すれば、外乱の影響をフィードフォワード (FF) 制御器にてキャンセルすることが可能である。なお、制御におけるサンプリングタイムは 1[msec] とした。

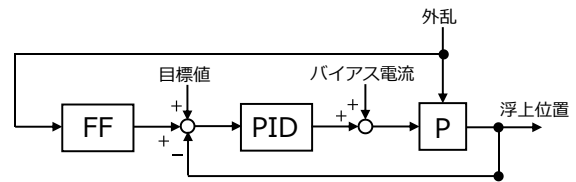


図 8 Filtered- ϵ ブロック線図

ここで、PID による安定化した系を FF 制御における制御対象とするとき、制御対象、その逆システム、FF 制御器のそれぞれを LMS アルゴリズムにて逐次的に導出する際の、諸設定値を表 2 に示す。

表 2 LMS アルゴリズムにおける諸設定値

	制御対象	逆システム	FF 制御器
繰返し回数	600,000	10,000,000	3,000,000
推定パラメータ数	300	50	250
推定重み	30	0.03	0.000001

3. 3. 1 制御対象モデルの推定

まず、PID 制御により安定化した系に対して、LMS アルゴリズムを用い、FIR モデルを逐次的に導出する。図 9 に、FF 制御における制御対象を推定するためのブロック線図を示す。推定モデル M の出力と、P の出力信号との誤差が最小になるように M の FIR モデルを逐次的に推定する。推定結果を図 10 に示す。(a)が推定誤差の推移、(b)が P の出力値と M からの推定値の収束値との比較、(c)が推定された FIR モデルである。良好に推定されていることが分かる。

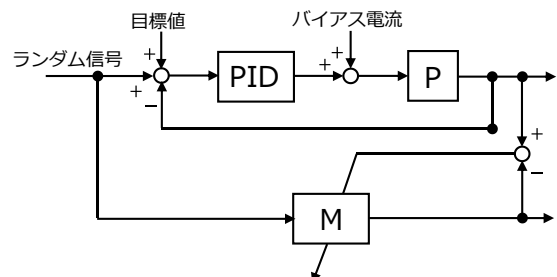
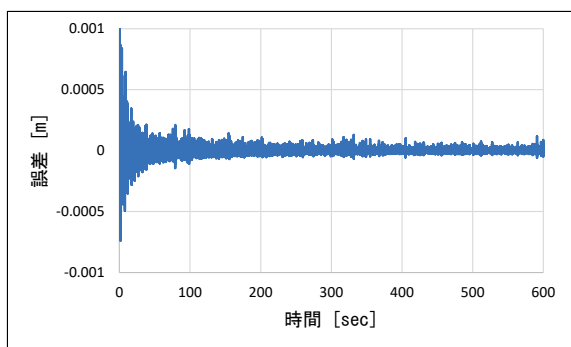
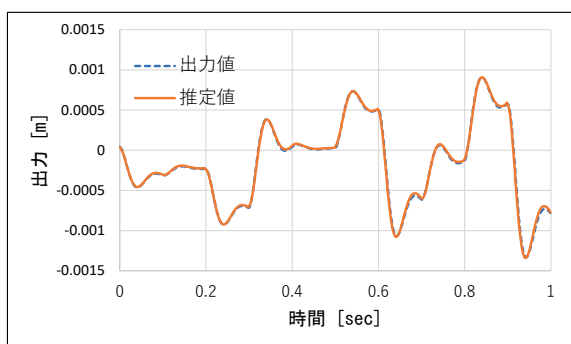


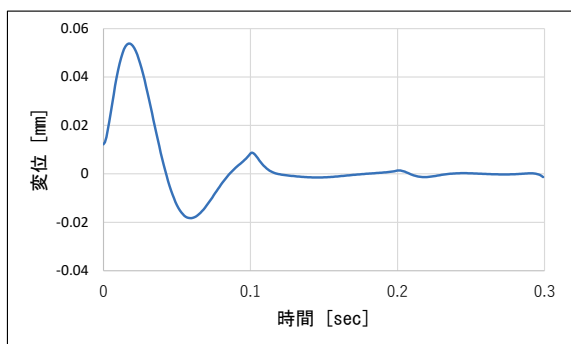
図 9 FF 制御における制御対象の推定



(a) 制御対象の推定誤差の推移



(b) 出力信号の比較



(c) 推定された FIR モデル

図 10 制御対象の推定結果

3. 3. 2 制御対象の逆モデルの推定

次に、求めた制御対象の逆モデルを、逐次的に導出する。離散化したモデルは一般に非最小位相系であり、したがって逆モデルは不安定となるので、逐次的に導出できない。そこで図 11 に示すように、遅れ要素 Δ を用意し、遅れステップ数を、求めるパラメータ数の半数とすることで、最適な逆モデルを導出することが可能となる⁴⁾。図 12 に、求めた逆モデルを示す。(a)は、遅れ要素からの出力と、導出する逆モデルの出力との誤差の時間推移、(b)は、遅れ要素からの出力と、収束後の逆モデルの出力信号との比較、(c)は、求めた FIR モデルである。(b)に若干の誤差がみられるが、おおむね良好に導出されているといえる。

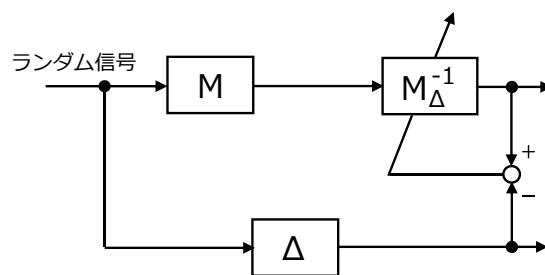
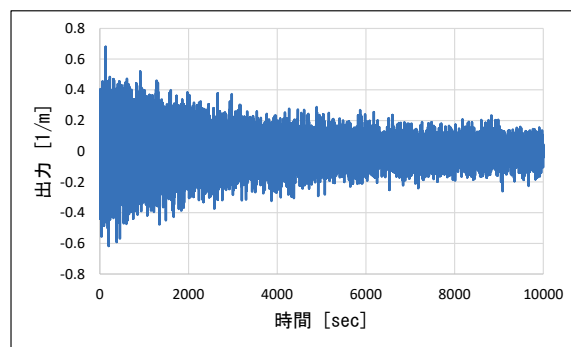
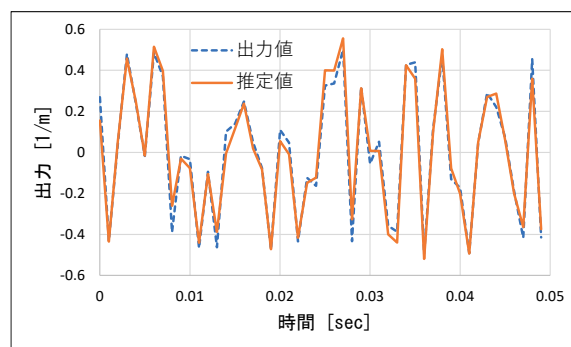


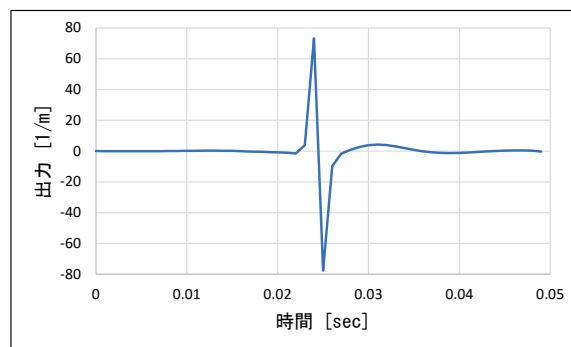
図 11 制御対象の逆モデルの推定



(a) 逆モデルの推定誤差の推移



(b) 出力信号の比較



(c) 推定された FIR モデル

図 12 逆モデルの推定結果

3. 3. 3 FF 制御器の導出

最後に、逆モデルを用いて FF 制御器を逐次的に導出する。ブロック線図を図 13 に示す。Z 軸をランダムに駆動すると同時に、そのランダム信号を遅れ要素 Δ に通過させ、構築す

る FF 制御器の入力とする。FF 制御器の逐次的な調整は、浮上位置信号を逆モデルに通過させた信号を用いる。逐次的に求められる FF 制御器は、その都度制御対象の前に配置した FF 制御器にコピーして用いる。このような制御系を構築することにより、外乱として加えたランダム信号の影響を、位置信号からキャンセルするような制御入力が FF より生成される。

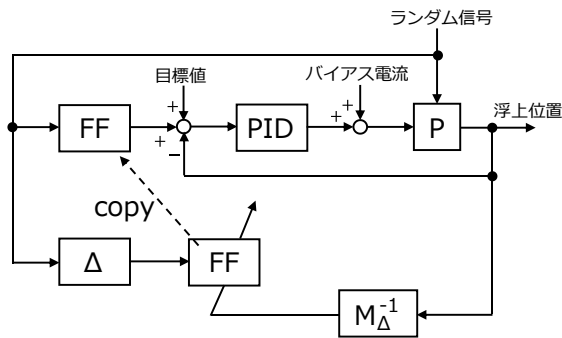


図 13 FF 制御器の導出

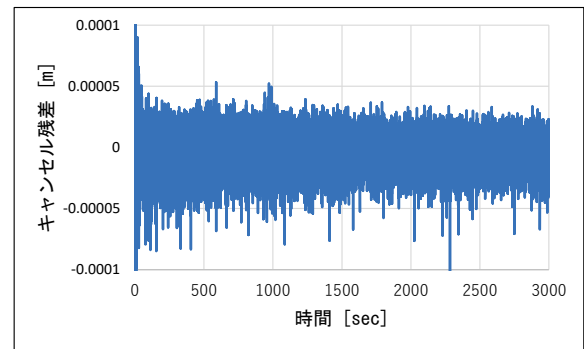
図 14 に、FF 制御器の導出結果を示す。(a)は、推定誤差の時間的推移、(b)は、FF 制御器が収束後の、ランダム信号(外乱)に対する出力(浮上位置)と、制御入力に対する出力の波形の比較、(c)は、導出された FF 制御器の FIR モデルである。なお、ランダム信号の周期は 0.1 秒とした。(a)より、完全に FF 制御器が収束していないようにもみえるが、(b)の波形の比較より、FF 制御器の導出時間は充分であると判断した。

4. 制御シミュレーション結果

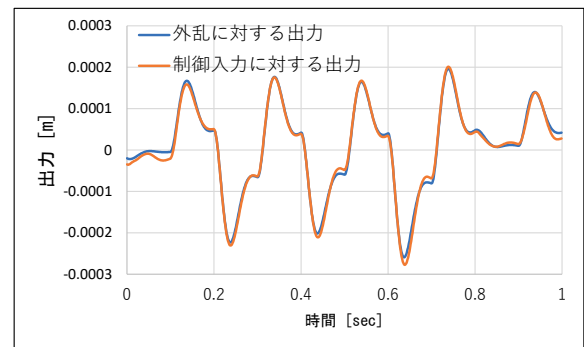
前述した 3 種類の制御系を設計し、シミュレーションを行った。直交 3 軸ステージの垂直軸である Z 軸を、上方向へ 0.1m 動かすことを想定している。Z 軸には、変位センサを内包する電磁石が固定されており、Z 軸と電磁石は、完全に同じ動きをすると仮定する。つまり、固定部の弾性変形は考慮しない。

想定する Z 軸の動作は、0.5 秒間 0.1m/s² で加速し、1.5 秒間等速運動した後、再び 0.5 秒間 0.1m/s² で減速して停止する。この様子をグラフにしたものを図 15 の(a)、(b)に示す。(a)が Z 軸の上方向の動作(位置)、(b)が Z 軸の加速度である。この動作が、浮上系においては外乱として作用し、浮上物体の浮上位置を変化させる。前述した 3 つの制御系を用いた際の、浮上物体の位置を、図 15 の(c)に示す。目標浮上位置は 5[mm] とし、電磁石に対する浮上物体の相対位置をグラフ化した。

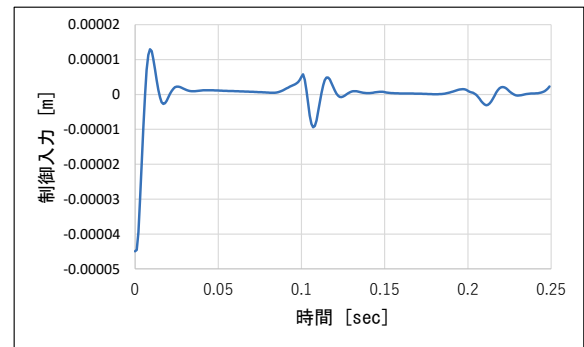
青色の破線が、MPC を用いて浮上系を安定化した場合の、浮上位置の変化である。3. 1 で示したとおり、非常に俊敏に外乱に対して応答しているが、偏差を埋めることができ



(a) コントローラの推定誤差の推移



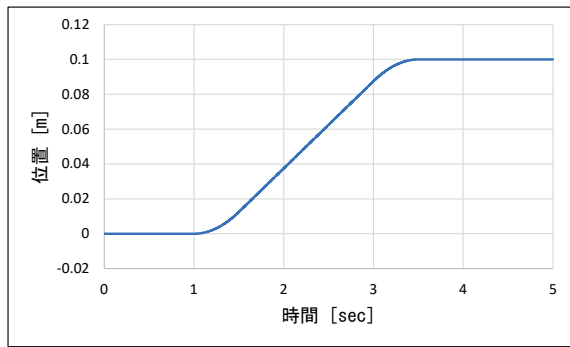
(b) 出力信号の比較



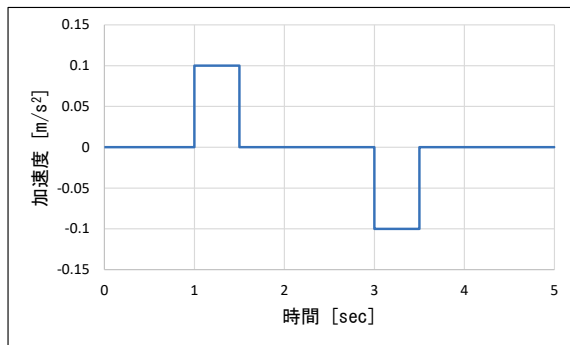
(c) 導出された FIR モデル

図 14 制御器の導出結果

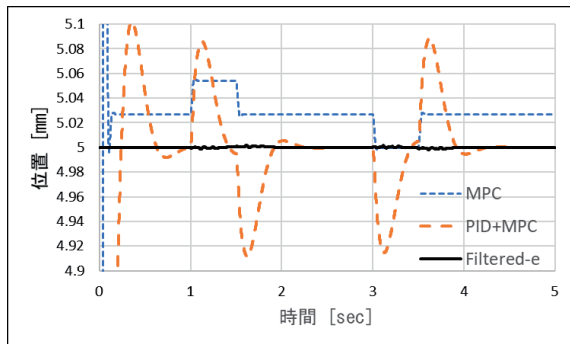
いない。閉ループの周波数応答を求め、低域における積分特性や、安定余裕を調査する必要があると思われる。赤の破線が、PID 制御により安定化した系に対して、MPC を用いた制御系の応答である。こちらも 3. 2 で示したとおり、比較的緩やかな応答となっている。0.1[mm]程度の浮上物体の振れがみられるが、約 0.5 秒で目標位置に収束させることができている。黒線は、PID 制御により安定化した系に対して、FF 制御器を用いて外乱をキャンセルした結果である。グラフからは読み取れないが、約 0.002[mm]程度の揺れが残っているのみで、ほぼ完全にキャンセルに成功している。なお、図 15 の(d)には、3 つの制御方法を用いた際の、電磁石に流れる制御入力電流値を示した。非常に興味深いのは、外乱の加速度が不連続に変化した瞬間に、波形に若干の差異



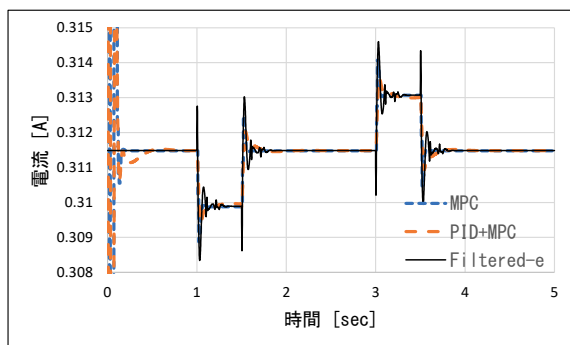
(a) Z軸の位置



(b) Z軸の加速度



(c) 浮上物体の位置



(d) 制御入力電流

図 15 垂直搬送シミュレーション結果

が認められるが、それ以外はほぼ同形である点である。加速度が不連続に変化すれば、対象物には衝撃力が加わり、一般にはそれが好ましくない振動を引き起こす。外乱の加速度が

不連続に変化した瞬間の制御入力値が、浮上物体の外乱に対する動作を支配しているといえる。

図 16 に、図 15(d) における、外乱の加速度が不連続に変化する 1 秒付近の波形を拡大したものを示す。ここでさらに興味深いのは、FF 制御器である Filtered- ϵ のみが、最初に逆方向への入力を生成している点である。これは、非最小位相系におけるステップ応答に見られる現象であり、すなわち、キャンセルーションを実現するための FF 制御器は、不安定零点を持っているといえる。

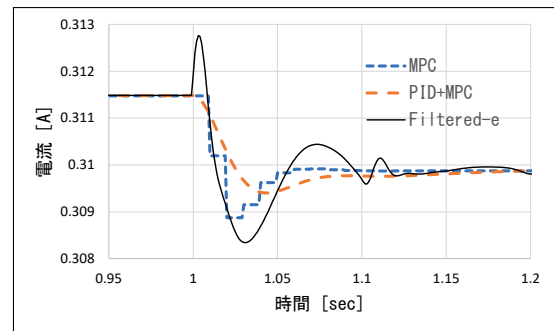


図 16 制御入力電流 (拡大図)

5. 結言

3 軸ステージの垂直駆動軸である Z 軸に、変位センサを内包した電磁石を設置し、浮上物体を上方向へ搬送する際の、安定に搬送するための制御系の構築および、その性能評価のためのシミュレーションを行った。MPC のみを用いた場合、PID 制御により安定化した系に対して MPC を用いた場合、Filtered- ϵ を用いた FF 制御を用いた場合の、3 種類の制御系を構築し、Z 軸の動作に対する浮上物体の変位を計算した。FF 制御器を用いた場合が、最も良好に搬送できることが分かった。ただし、制御器の導出に長時間かかるという問題があり、MPC と FF 制御との併用が現実的だと考えている。実機を用いた実験により検証する予定である。

参考文献

- [1] Y. Mitani, R. Tanaka, et al., Non-contact Conveyance Control System with Self-identification Function of the Levitation Object -Investigation of Stability of the Conveyance Control System-, MoViC2018, (2018)
- [2] 上, 田中, 三谷, 延山, 電気学会論文誌 C, Vol. 139, No. 4, pp. 402-408, (2019)
- [3] Mathworks, Control of an Inverted Pendulum on a Cart, <https://jp.mathworks.com/help/mpc/ug/control-of-an-inverted-pendulum-on-a-cart.html> (2020.7.29 参照)
- [4] R. Widrow, E. Walach, Adaptive Inverse Control, Prentice Hall, (1996)