

- 卒業論文 -

**磁気ディスク装置の
省エネルギーシーク軌道生成法**

平成20年2月12日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学工学部電気工学科

60356 石原 太一

概要

本論文は、磁気ディスク装置のシーク動作の省エネルギー化について扱ったものである。磁気ディスク装置のシーク動作とは、磁気ディスク上において磁気情報を読み取る磁気ヘッドを、ディスク内の目的の位置まで移動させる動作である。昨今益々省エネルギー化を迫られている電気製品であるが、磁気ディスクも例外に漏れずその消費エネルギーの低減を求められている。しかし、磁気ディスクの、特にシーク動作に関しては、その省エネルギー化に着目されることはほとんどなかった。よって本論文ではシーク動作の省エネルギー化に貢献することを目標としている。

磁気情報を読み取る磁気ヘッドは VCM と呼ばれるモータによって駆動しているため、その入力値を考慮した入力波形を作成できるように、また、任意の時間と距離を与えられた場合に解けるように、ある決まった形の波形を作ることを提案する (図 4 参照)。これをもとに、入力を行う時間を調節することで、適切な電流値を算出できるような計算方法を考案した。また、その消費エネルギーを考えたときに、与えられたシーク時間内で消費エネルギーを最小化するような入力値が存在することがわかった。また、シーク時間に余裕を持たせることにより、さらに消費エネルギーが抑えられることも確認した。

次に、加速時間と減速時間を変化させて、そのときの入力値を決定し、消費エネルギーが最小になるようなものを考察した。すると、外乱を考慮しない場合では、消費電力が最小になるような入力値は、加速時間減速時間がともにシーク時間の $\frac{1}{3}$ になるような入力であることがわかった。次に、定常外乱を考慮し、加速時間と減速時間によって入力値が決定できるようにした。すると、外乱によって、消費エネルギーが最小になる加速時間と減速時間の組み合わせが変化することがわかった。その結果については解析的に求めることができ、シーク距離とシーク時間が与えられることで、消費エネルギーを最小にする加速時間および減速時間が算出できることを示している。

最後に、今回提案した手法の消費エネルギーを比較しているが、定常外乱の減速を考慮した制御を行うよりも、外乱を補償するような余剰な入力を加えることで、加速時間と減速時間を最適化することで消費電力が低減することを示している。

目次

1	序論	3
1.1	研究の背景	3
1.2	本研究の目的	3
2	磁気ディスク装置のシーク制御系	4
2.1	磁気ディスク装置の制御構造	4
2.2	磁気ディスクのデータ構造と just-in-time 理論	4
2.3	電気学会 HDD ベンチマーク問題	5
3	目標軌道設計のための問題設定	5
3.1	シーク動作の運動モデル	5
3.2	開始条件と終端条件	6
3.3	消費エネルギーの定義	6
3.4	just-in-time 理論を実現するための要件	6
4	シーク軌道生成	7
4.1	波形を限定した場合のシーク軌道の計算	7
4.2	波形の生成例	8
4.2.1	フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (1)	8
4.2.2	消費エネルギーの評価	9
4.2.3	シーク時間一定で入力を行う時間を変化させた場合	10
4.2.4	シーク時間を変化させた場合	10
4.2.5	消費エネルギーを最小化する入力値および入力時間の導出	11
4.3	加速時と減速時で出力可能な入力値が異なる場合	11
4.3.1	フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (2)	12
4.3.2	消費エネルギーの評価	13
4.4	定常外乱を考慮した場合の波形とその消費エネルギー	14
4.4.1	フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (3)	14
4.4.2	消費エネルギーの評価	15
4.5	外乱を考慮し、加速時間と減速時間を独立に動かした場合	17
4.5.1	フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (4)	17
4.5.2	消費エネルギーの評価	18
5	定常外乱を考慮した場合の消費エネルギーの比較	21
6	結論	23
6.1	本論文のまとめ	23
6.2	今後の課題	23
	参考文献	24

1 序論

1.1 研究の背景

磁気ディスクは、コンピュータを主とする電子情報機器・情報家電の外部記憶媒体として用いられており、コンピュータの歴史とともに大きな発展を遂げている。現在では、電子情報機器の小型化・モバイル化の需要を受けて、外部記憶媒体としての磁気ディスクも小型化に加えて、バッテリーのみの長時間使用に耐えるための省エネルギー化が早急に迫られている。今回着目しているシーク動作とは、図1に示す磁気ディスクの構造のうち、磁気ヘッドを目的のトラックまで移動させる機械的な動作である。磁気ディスクの省エネルギー化問題における制御工学の役割の1つに、このシーク動作の消費エネルギーを低減させることがある。なお、シーク動作に関しては、その運動性能を向上させるために様々な論文や研究内容が発表されている。終端状態制御法 [1] や、時変重みを利用して詳細に運動性能を決めることができる高速高性能なシーク制御 [2] などがあり、それらはナノスケール制御と呼ばれており、現在も様々な研究がなされている [3]。しかし、シーク動作自体の省エネルギーを目的とした論文はほとんど見られない。

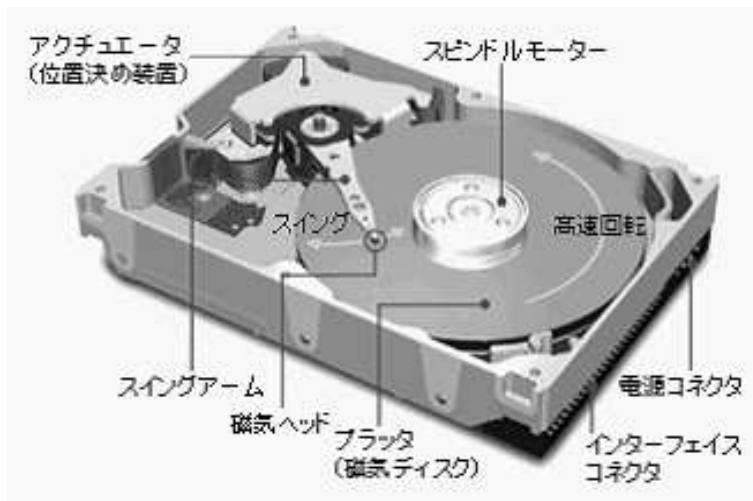


図 1: 磁気ディスク装置の構造

1.2 本研究の目的

従来までは、シーク動作にかかる時間、平均シーク時間はシーク軌道を生成するうえでは固定であり、目標トラックの物理的な位置に関係なく計算されていた。ところが、これでは目標とするトラック位置に達したところで最大ディスク1回転分の回転待ち時間が発生し、その間は外乱に耐えながらヘッドを固定させなければならない。

本研究では、シーク動作の省エネルギーを実現させる1つの方法として、Just-in-time という理論 [4][5] を考慮する。ディスクの回転時間とヘッドの移動時間を考慮した、できるだけ回転待ち時間を少なくするためのシーク時間を利用できるようにするため、現在まで固定長であったシーク時間を可変にできるよう、任意に与えられるシーク時間と目標トラック位置から、エネルギー消費を最小化するような最適軌道を生成する方法を考える。

2 磁気ディスク装置のシーク制御系

2.1 磁気ディスク装置の制御構造

図2に磁気ディスク装置の制御構造を示す。磁気ディスク装置のシーク制御系は、制御対象であるヘッドが取り付けられたVCM(ボイス・コイル・モータ)と、目標値であるデータを記録再生するためのディスク媒体と、制御装置であるデジタルコントローラを含む回路の3つのブロックで構成される。ディスク媒体には同心円状に多数のトラックが形成されており、各トラックにはデータの他にサーボ情報と呼ばれる位置信号が記録されている。ヘッドはサーボ情報を読み取り、ディスク媒体上でのヘッド位置を検出することができる。ヘッドから読み込まれたサーボ情報は制御装置へ入力される。デジタルコントローラは読み取られたサーボ情報を元に、設定された制御プログラムに従って指令値を算出する。この値はD/A変換器やアンプにより駆動電流に変換され、VCMを駆動させる[6]。

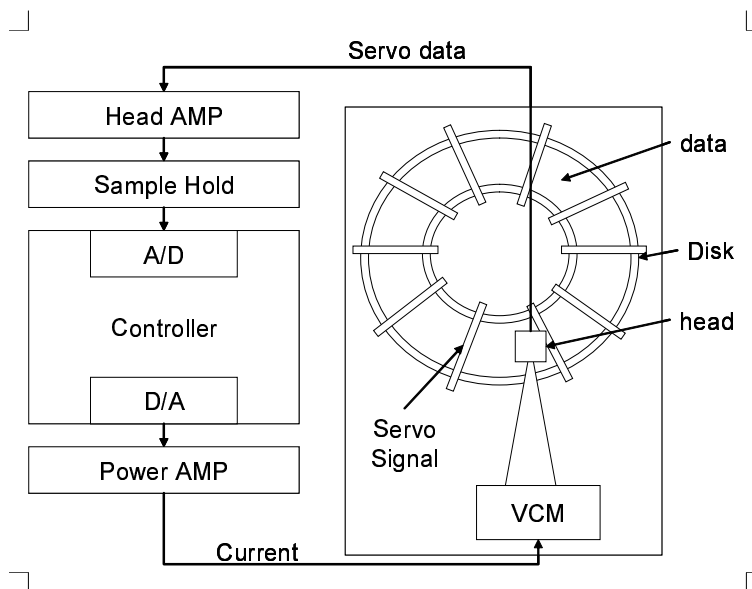


図 2: 磁気ディスク装置の制御構造

2.2 磁気ディスクのデータ構造と just-in-time 理論

磁気ディスクについて説明を行う。磁気ディスク上には磁気情報が記されているが、各データのことを、回転方向には”セクタ”、セクタが連なって同心円状に配置されているものを”トラック”と呼ぶ(図3)。従来のシーク動作において、シーク動作に要する時間、すなわちシーク時間はトラック間距離のみを考慮して設定されていた。この方法では、目標のトラックに磁気ヘッドが到達したところで目標のセクタが到達するまでディスクの回転を待つ時間が発生する。この待ち時間を減少させるために、シーク時間をトラック間距離だけでなくセクタ間距離も考慮して決定したい。この考え方が just-in-time 理論である。

シーク動作における従来存在していた回転待ち時間を減らすために、目標トラックだけでなく目標セクタも考慮したシーク時間を設定する。これにより、一般的には従来のシーク時間よりも長いシーク時間をとることになるが、それにより従来よりも消費エネルギーを減らすことができるほか、

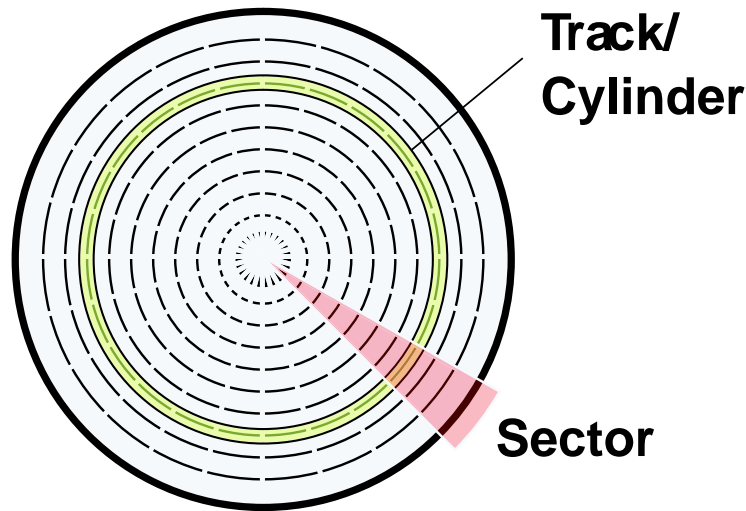


図 3: 磁気ディスク上のデータ構造 (出典 : wikipedia)

シーク速度を減少させることができるためジャーク及び騒音の減少にもつながる。just-in-time 理論を実現することによるメリットは大きい。

本研究では、シーク時間の算出には手をつけず、just-in-time 理論実現のために必要なシーク軌道計算法を提案することが目的である。

2.3 電気学会HDDベンチマーク問題

電気学会では、磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系を広く勉強できるようにMATLAB プログラムによるHDDベンチマーク問題を配布している。このベンチマーク問題では、各種の制御理論シミュレーションを行う際に必要不可欠な、精密にモデリングされた磁気ディスクのプラントおよび外乱を提供している。本研究ではこのHDDベンチマーク問題で設定されているプラントの特性値を利用してシミュレーションを行った。具体的には以下の値を採用している。

- $RPM = 7200[rpm]$
- $NumberOfServoPerTrack = NPT = 220[servo/track]$
- サンプル時間 $T_s = \frac{60}{RPM \cdot NPT} = 3.78... \cdot 10^{-5}[sec]$
- $Gain[track/m] = 3.937 \cdot 10^6[track/m]$

3 目標軌道設計のための問題設定

3.1 シーク動作の運動モデル

シーク動作の理想的な連続時間モデルは、式(1)(2)に示すように、単純な2重積分モデルである。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} Gain & 0 \end{bmatrix} x \quad (2)$$

$$Gain = 3.937 \cdot 10^6 [track/m] \quad , \quad x = \begin{bmatrix} position[m] \\ velocity[m/sec] \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 開始条件と終端条件

シーク距離を L_{all} 、シーク時間を T_{sk} とおいたとき、シーク動作が満たすべき条件は次式のようになる。

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad x(T_{sk}) = \begin{bmatrix} \frac{L_{all}}{Gain} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 消費エネルギーの定義

磁気ディスク装置のシーク動作において、消費エネルギーを評価する場合は、動作を掌る VCM に流れる電流量の二乗に比例する。 $R =$ 抵抗, $I =$ 入力電流 として、消費エネルギー W は次のように表される。

$$W = \int_0^{T_{sk}} R \cdot I^2 dt \quad (5)$$

本論文では、消費エネルギーを考察するために、離散時間で作成した入力波形に対して以下の計算を行い、消費エネルギーを示す指標としている

$$W = \sum_{n=0}^{all} I(n)^2 \quad (6)$$

3.4 just-in-time 理論を実現するための要件

just-in-time 理論を現実に適用させるために、また、研究目的を果たすためには次の要件を満たす計算法が必要である。ただし、次に述べる”シーク時間”は、サンプリング時間を基本単位とする。

- 任意のシーク時間とシーク距離が与えられたとき、シーク軌道を導出する
- 考えられるシーク軌道の中で、消費エネルギーが最小となるシーク軌道を導出する

これを念頭に置き、本研究では入力信号波形をシンプルなものに限定し、与えられたシーク時間およびシーク距離をもとに、消費エネルギーを最小とするシーク軌道を生成するような計算法を提案する。

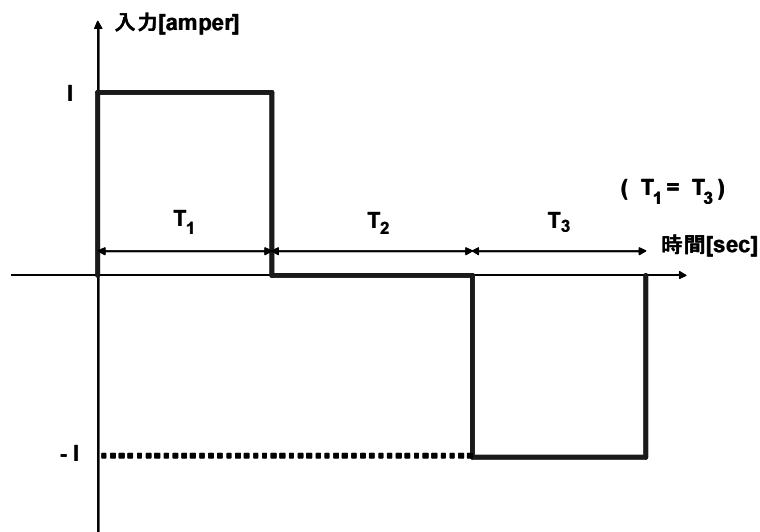


図 4: 今回作成した入力信号波形

4 シーク軌道生成

4.1 波形を限定した場合のシーク軌道の計算

シークモデルを前項のものと仮定し、さらに、波形を図 4 に示すような単純なものと仮定した場合、シーク動作実現に必要な入力は数値計算によって求めることができる。また、シーク時間 T_{sk} を、サンプリング時間 T_s を基本単位としたステップとして次式のように表す。

$$T_{sk} = T_1 + T_2 + T_3 \quad (7)$$

$$T_1 = T_3 \quad (8)$$

$$T_{sk} = T_s \cdot S_{all} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = T_s \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$S_{all} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (11)$$

$$S_1 = S_3 \quad (12)$$

電流値を I 、最大速度を V 、シーク距離を $L_{all}[track]$ 、総ステップ数を $S_{all}[step]$ 、サンプリング時間を $T_s[sec]$ とおくと、関係式として次式が得られる。

$$V = 1000 \cdot I \cdot (T_s \cdot S_1) \quad (13)$$

$$\frac{L_{all}}{Gain} = 1000 \cdot I \cdot (T_s \cdot S_1)^2 + 1000 \cdot I \cdot (T_s \cdot S_1) \cdot (T_s \cdot S_2) \quad (14)$$

この 2 式と式 (11)(12) より、次のように I と V が表される。

$$I = \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{T_s \cdot Gain} \cdot \frac{1}{S_1 \cdot (S_{all} - S_1)} \quad (15)$$

$$V = \frac{L_{all}}{T_s \cdot Gain} \cdot \frac{1}{S_{all} - S_1} \quad (16)$$

この計算式より、シーク距離とシーク時間が与えられたときに、さらに入力時間を決定すれば、入力値を決定することができる。こうして作成した波形は次のような離散形となる。

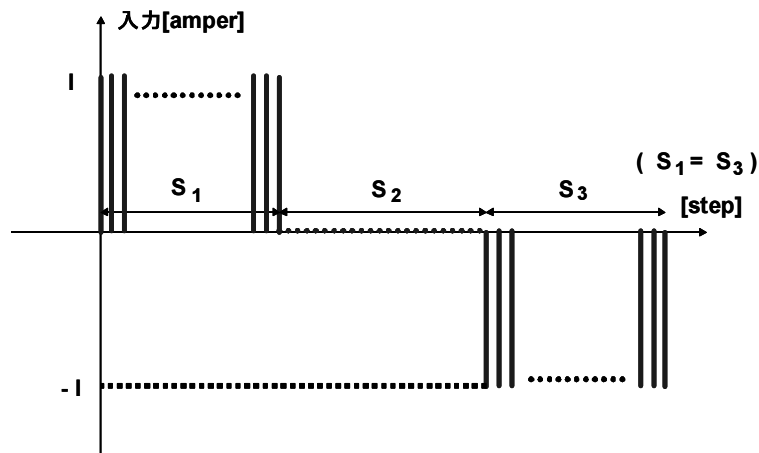


図 5: 今回作成した入力信号波形 (離散形)

4.2 波形の生成例

前項の計算に基づいて、一例を挙げて波形を作成する。ただし、本節の入力波形は、離散形で作成したものをサンプル時間 T_s の 0 次ホールドを用いて連続系の波形に変換したものであり、出力波形は変換した入力を連続系プラントに入力したものである。 $S_1 = 3, S_{all} = 20, L_{all} = 1[track], T_s = 0.05[msec]$ の場合には図 6 のような波形が作成され、ノミナルプラントからの出力は図 7 のようになる。きちんと目標 ($L_{all} = 1$) に追従できていることがわかる。

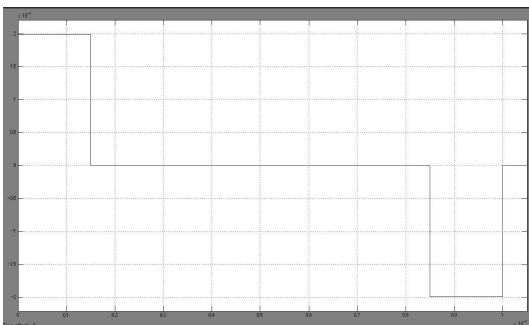


図 6: 入力信号波形のサンプル

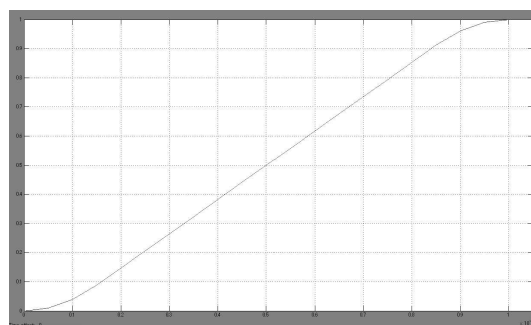


図 7: プラントからの出力

4.2.1 フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (1)

本節のシーク軌道計算では、連続時間プラントをサンプリング時間 T_s の 0 次ホールドにより離散時間プラントに変換した式 (17) のものを用いて、離散形で作成した信号を離散形のプラントに入力している。

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot x(k) + \begin{bmatrix} 500 \cdot T_s^2 \\ 1000 \cdot T_s \end{bmatrix} \cdot u(k) \quad (17)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} Gain & 0 \end{bmatrix} x(k) \quad (18)$$

$$k = \text{from } 0 \text{ to } S_{all} \quad , \quad Gain = 3.937 \cdot 10^6 [\text{track}/m] \quad , \quad x(k) = \begin{bmatrix} position(k) \\ velocity(k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

磁気ディスクモデルのパラメータをより現実のものに近づけた値にするために、フルストロークシークを仮定し、総ステップ数を固定し、入力を行うステップ数を1から10ステップずつ増加させて作成した入力は図8のようになる。ただし、位置・速度情報に関しては計算結果から得られるステップ状のグラフでは見づらいため、図8では点間を補完してなめらかに表示してある。ここでは、日立製3.5インチハードディスクドライブのデータシート及びベンチマークプログラム中の値を参考にし、 $S_{all} = \text{floor}(\frac{14.7 \cdot 10^{-3}}{3.78 \cdot 10^{-5}}) = 388[\text{step}]$, $L_{all} = 0.03 \cdot Gain = 118110[\text{track}]$, $T_s = 3.78 \cdot 10^{-5}[\text{sec}]$ として計算を行っている。入力を行うステップ数を増やすと、位置変化は曲線的になり、最大速度は増

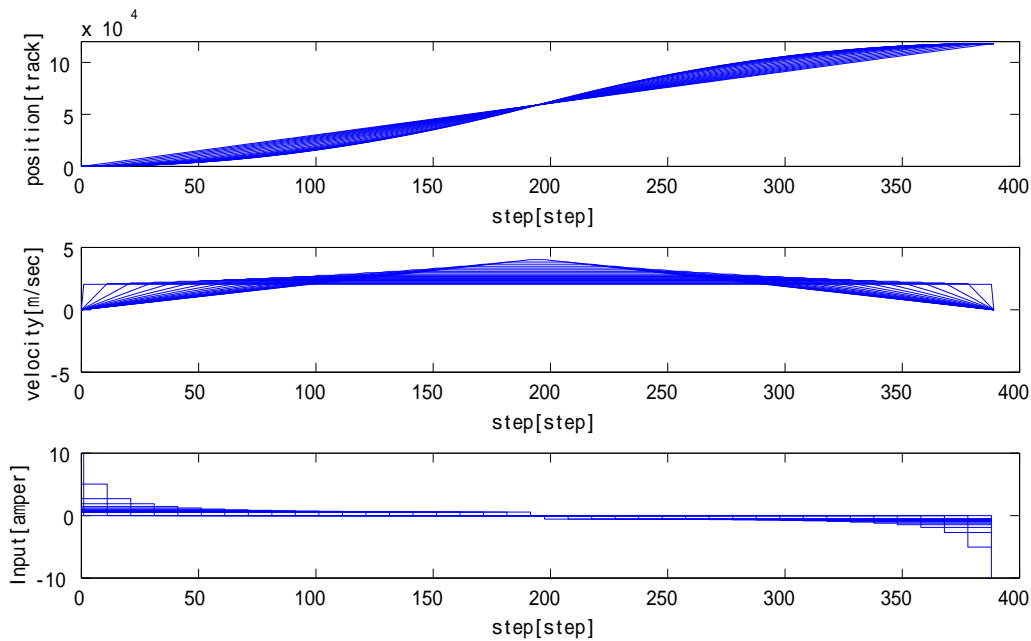


図 8: フルストロークシークにおいて入力を行うステップ数を変化させたときの入力及び状態変数の動き

加し、入力値は急激に減少している。

4.2.2 消費エネルギーの評価

本章では、連続時間プラントをサンプリング時間 T_s の 0 次ホールドにより離散時間プラントに変換した式 (17) のものを用いて、離散形で作成した信号を離散形のプラントに入力している。

4.2.3 シーク時間一定で入力を行う時間を変化させた場合

前項と同様に、フルストロークシークを仮定して、総ステップ数を固定し、入力を行うステップ数を1から1ステップずつ増加させ作成したそれぞれの入力値の2乗ノルムを計算させると、入力を行うステップ数 S_1 の変化により図9のように変化する。このグラフからは、入力を行うステップ数を

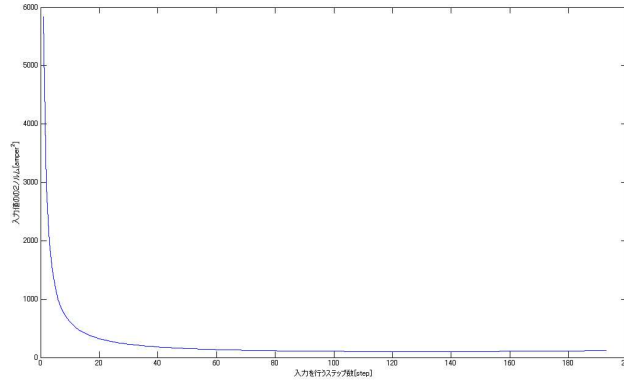


図 9: 入力を行うステップ数とその時の消費エネルギー

増すことで消費エネルギーが減少することがわかる。さらに、 $S_1 = 160$ 付近を拡大すると、図10のようになっている。この結果を見ると、消費エネルギーを最小化するような S_1 が存在することがわ

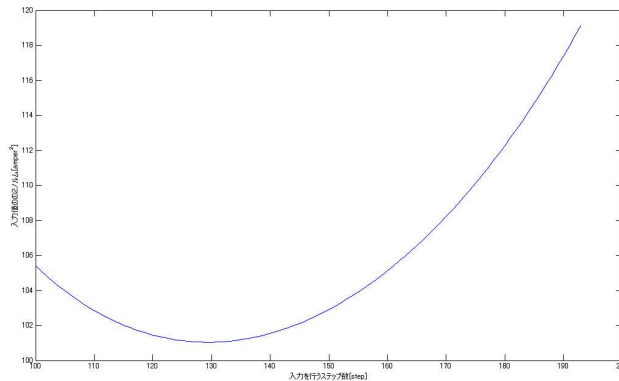


図 10: 入力を行うステップ数とその時の消費エネルギー (拡大)

かる。消費エネルギーを最小にするような適切な入力値と入力時間が存在するということである。

4.2.4 シーク時間を変化させた場合

次に、総ステップ数を変化させた場合、消費エネルギーが減少していくことを確認する。

図11に示すのは、フルストロークシークにおいてシーク時間を平均値から1ステップずつ、220ステップ(約一周分)まで増加させて各ステップ毎に最小となる消費エネルギー、そのときの入力値 I 、および入力を行うステップ数 ($S_1 + S_3$) を表したものである。この図より、シーク時間に余裕を持たせることで消費エネルギーを低減できることを再確認した。また、入力値も $1[A]$ 以下となり、低い値に抑えられている。

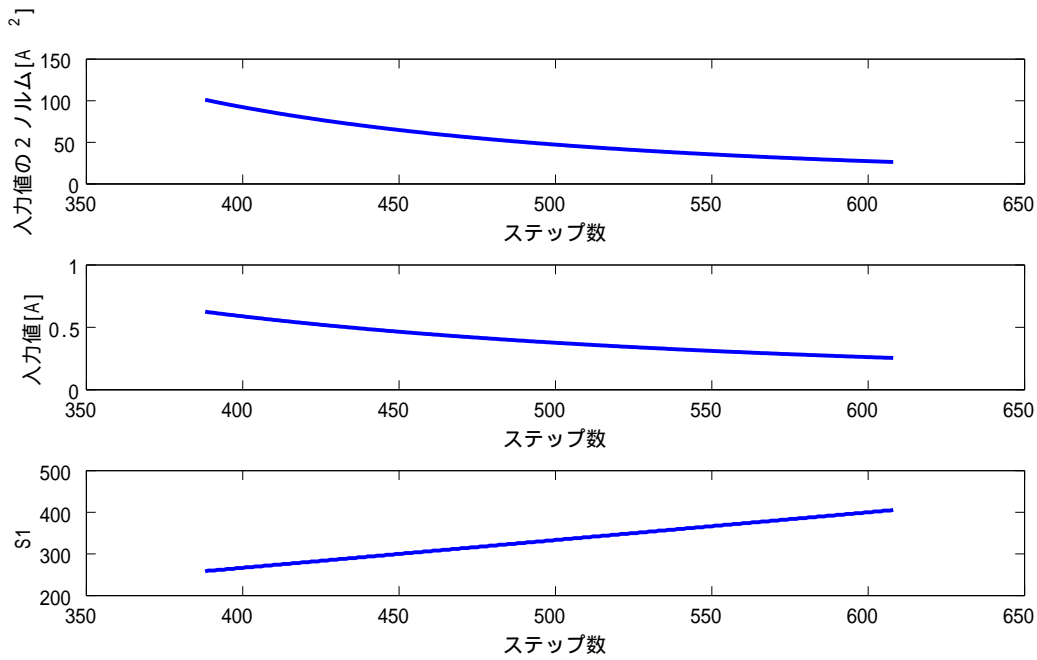


図 11: 総ステップ数を変化させたときの消費エネルギー、入力値、入力を行うステップ数

4.2.5 消費エネルギーを最小化する入力値および入力時間の導出

消費エネルギーを定式化すると、式 (20) のようになる。

$$W = \sum_{n=0}^{all} I(n)^2 = 2 \cdot S_1 \cdot I^2 = 2 \cdot S_1 \cdot \left(\frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{T_s \cdot Gain} \cdot \frac{4}{S_{all}^2 - S_1^2} \right)^2 = \left(\frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{T_s \cdot Gain} \right)^2 \cdot \left(\frac{2}{S_1 \cdot (S_{all} - S_1)^2} \right) \quad (20)$$

この W が最小値を示すときの S_1 の値は、式 (23) の計算により $S_1 = \frac{1}{3} \cdot S_{all}$ と求まる。

$$W' = 0 \quad (21)$$

$$\iff 0 = \frac{3 \cdot S_1 - S_{all}}{S_1^2 \cdot (S_{all} - S_1)^3} \quad (22)$$

$$\iff S_1 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} \quad (23)$$

実際に、入力を行うステップ数 S_1 の値を取得し、総ステップ数に対する比を算出してみると、図 12 に示すように、総ステップ数に対してほぼ $\frac{1}{3}$ 程度の比となっている。これより、消費エネルギーを最小にする入力値と入力時間は、シーク時間が与えられると簡単に求められることがわかる。これより、消費エネルギーを最小化するステップ数および入力値は、与えられたシーク時間から求められることがわかる。

4.3 加速時と減速時で出力可能な入力値が異なる場合

磁気ディスク装置において、加速時の入力値と減速時の入力値が異なる場合を考える。これは、磁気ディスク装置の機構の様々な要因、たとえば前述した定常外乱などにより、入力のしやすさに指向

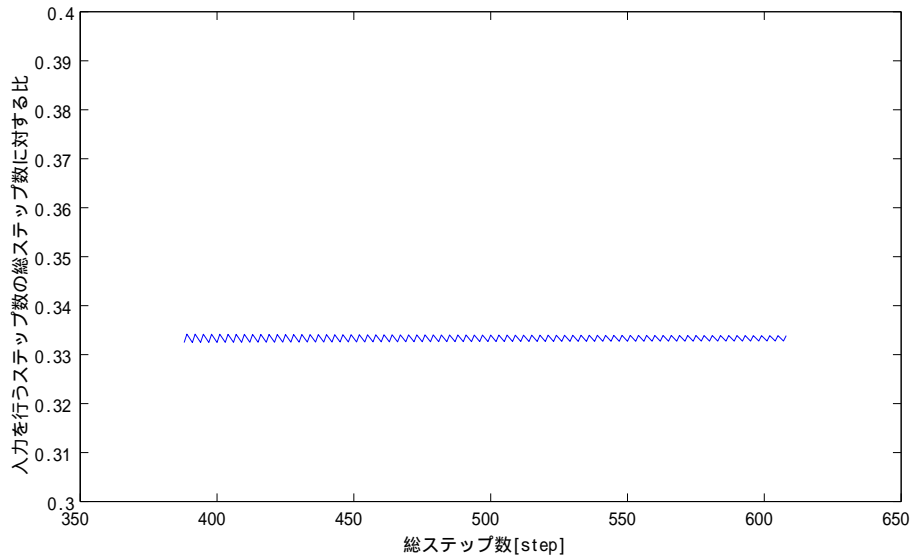


図 12: 消費エネルギーを最小化する、入力を行うステップ値の、総ステップ数に対する比

性がある場合を想定している。この場合は、加速と減速の入力が異なるためそれぞれ異なるステップ数で行われる。

本節にて作成しようとしている波形を図 4.3 に示す。

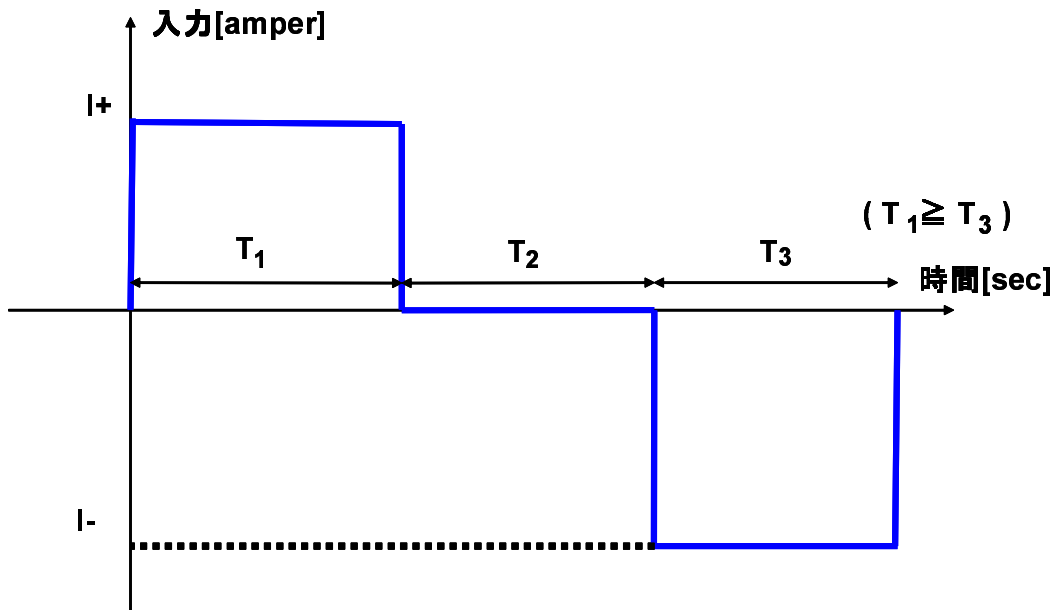


図 13: S_1, S_3 を一定比で変えたときの作成波形

4.3.1 フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (2)

本節では、ステップ数条件 $K = \frac{S_3}{S_1}$ ($S_3 < S_1, 0 < K \leq 1$) を加える。これは、精度の悪いものから値を決定するべきだと考え、入力値条件より先に設定した。

このとき、速度条件および位置条件は次式のようになる。

$$0 = 1000 \cdot I_+ \cdot (T_s \cdot S_1) + 1000 \cdot I_- \cdot (T_s \cdot S_3) \quad (24)$$

$$\frac{L_{all}}{Gain} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot I_+ \cdot (T_s \cdot S_1)^2 + 1000 \cdot I_+ \cdot (T_s \cdot S_1) \cdot (T_s \cdot S_2) + \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot |I_-| \cdot (T_s \cdot S_3)^2 \quad (25)$$

これより、入力値を S_1 および K を用いて表すと、

$$I_+ = \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{T_s \cdot Gain} \cdot \frac{2}{S_1 \cdot (2 \cdot S_{all} - K \cdot S_1 - S_1)} \quad (26)$$

$$I_- = -\frac{S_1}{S_3} \cdot I_+ = -\frac{1}{K} \cdot I_+ \quad (27)$$

となる。ここで $K = 1$ とおくと、 $S_1 = S_3$ とした最も単純な場合の計算結果と一致する。

4.3.2 消費エネルギーの評価

前項により求めた入力値を利用して、消費エネルギーの評価を行う。消費エネルギー W は本項目では次のように表される。

$$W = \sum_{all} I^2 \quad (28)$$

$$= I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3 \quad (29)$$

$$= I_+^2 \cdot S_1 + \frac{1}{K} \cdot I_+^2 \cdot S_1 \quad (30)$$

$$= \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{1 + \frac{1}{K}}{S_1(2 \cdot S_{all} - K \cdot S_1 - S_1)^2} \quad (31)$$

上式より、 W が最小値を取る条件は次式で表される。

$$\frac{\partial W}{\partial S_1} = 0 \quad (32)$$

$$\iff 0 = \frac{3 \cdot (1 + K) \cdot S_1 - 2 \cdot S_{all}}{S_1(2 \cdot S_{all} - (1 + K) \cdot S_1)^3} \quad (33)$$

$$\iff S_1 = \frac{1}{1 + K} \cdot \frac{2}{3} \cdot S_{all} \quad (34)$$

ただし、この条件の下では、 $S_1 + S_3 = (1 + K) \cdot S_1 = \frac{2}{3} \cdot S_{all}$ となり、 $S_2 = \frac{1}{3} \cdot S_{all}$ で、結局入力を行うステップ数は全体の $\frac{1}{3}$ とするときが消費エネルギーが最小となる。

この結果より、消費エネルギーを K で表すと、

$$W = \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{(1+K)^2}{S_{all}^2} \quad (35)$$

となり、これが最小値を取る K の値は $K = 1$ となる。これでは結局、外乱を考慮しない場合は $S_1 = S_2 = S_3 = \frac{1}{3} \cdot S_{all}$ と決めたときに消費エネルギーは最小値をとることになる。

これを踏まえて、次項では定常外乱を考慮した計算方法を提案する。

4.4 定常外乱を考慮した場合の波形とその消費エネルギー

磁気ディスク装置の制御系における代表的な外乱は、モータの機構などから生じる定常外乱である。この項目では、定常外乱としてプラントに対して一定の負の入力が加わる場合の入力波形生成および消費エネルギーについて考察する。なお、ここで用いる定常外乱は完全に推定可能な外乱と仮定しているほか、計算の簡単のため $S_1 = S_3$ の拘束条件を与えている。

4.4.1 フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (3)

定常外乱を考慮する場合、以下に示す 2 通りの波形生成の方法が提案できる。

- 余剰な入力により外乱を補償する軌道設計
- 外乱による減速を考慮した軌道設計

前者の場合では、入力波形が定常外乱分増すだけであり、その消費エネルギーに関する考察は定常外乱を考慮しない場合と変わらない。

入力に $Dist.$ を余剰に追加すると仮定すると、速度条件および位置条件は、外乱無しの場合と同じく、

$$1000 \cdot T_s \cdot (I_+ \cdot S_1 + I_- \cdot S_3) = 0 \quad (36)$$

$$\frac{L_{all}}{Gain} = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot I_+ \cdot (T_s \cdot S_1)^2 + 1000 \cdot I_+ \cdot (T_s \cdot S_1) \cdot (T_s \cdot S_2) + \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot |I_-| \cdot (T_s \cdot S_3)^2 \quad (37)$$

消費エネルギーは、

$$W = (I_+ + Dist.)^2 \cdot S_1 + Dist.^2 \cdot S_2 + (I_- + Dist.)^2 \cdot S_3 \quad (38)$$

$$= I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3 + Dist.^2 \cdot (S_1 + S_2 + S_3) + 2 \cdot Dist. \cdot (S_1 \cdot I_+ + S_3 \cdot I_-) \quad (39)$$

$$= I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3 + Dist.^2 \cdot S_{all} \quad (40)$$

となり、外乱に係る項は常に一定である。減少可能な項は $I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3$ であるが、これは拘束条件も含めて外乱無しの場合の計算式と同じであり、結局 $S_1 = S_3 = \frac{1}{3} \cdot S_{all}$ のときが消費エネルギーが最小となる。

そのときの消費エネルギーは

$$W = S_{all} \cdot Dist.^2 + \frac{L_{all}^2}{Gain^2} \cdot \frac{10^{-6}}{T_s^4} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)^2} \quad (41)$$

しかし後者では、補償を与えず外乱による減速を考慮したもののなので、その消費エネルギーが低減されると直感的には考えられる。よって、その消費エネルギーについて新たな考察が必要であると考えられる。本項目では後者について波形生成を行う。

後者では、加速時と減速時の入力異なるので、加速時の入力値を I_+ 、減速時の入力を I_- とした、次のような波形を得る。ただし、定常外乱による入力損失を $Dist.$ として表している。ただし、 $S_1 = S_3$ の条件を与えて計算を簡略化している。

定常外乱を考慮した場合の速度条件および位置条件は次式で表される。

$$0 = 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) + 1000 \cdot (-Dist.) \cdot (T_s \cdot S_2) + 1000 \cdot (I_- - const) \cdot (T_s \cdot S_3) \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{L_{all}}{Gain} = & 1000 \cdot \frac{1}{2} \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1)^2 + 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) \cdot (T_s \cdot S_2) \\ & - 1000 \cdot \frac{1}{2} \cdot Dist. \cdot (T_s \cdot S_2)^2 + 1000 \cdot ((I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) + (-Dist.) \cdot (T_s \cdot S_2)) \cdot (T_s \cdot S_3) \\ & + 1000 \cdot \frac{1}{2} \cdot (I_- - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_3)^2 \end{aligned} \quad (43)$$

これに $S_1 = S_3$ の条件を与え、入力値を S_1 を用いて表すと、

$$I_+ = \frac{1}{2} \cdot Dist. \cdot \frac{S_{all}}{S_1} + \frac{L_{all}}{Gain} \cdot \frac{10^{-3}}{T_s^2} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)} \quad (44)$$

$$I_- = \frac{1}{2} \cdot Dist. \cdot \frac{S_{all}}{S_1} - \frac{L_{all}}{Gain} \cdot \frac{10^{-3}}{T_s^2} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)} \quad (45)$$

のようになる。定常外乱の分、加速入力と減速入力が上昇している。
また、最大速度は次式で表される。

$$V = 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot S_1 \cdot T_s = 1000 \cdot \left(\frac{T_s}{2} \cdot Dist. \cdot \frac{S_2}{S_1} + \frac{L_{all}}{Gain} \cdot \frac{10^{-3}}{T_s} \cdot \frac{1}{(S_{all} - S_1)} \right) \quad (46)$$

ここで作成した入力を、0次ホールドを用いて連続系として作成した波形は図14のようになる。
ただし、 $Dist. = 0.2[amper]$ として計算している。

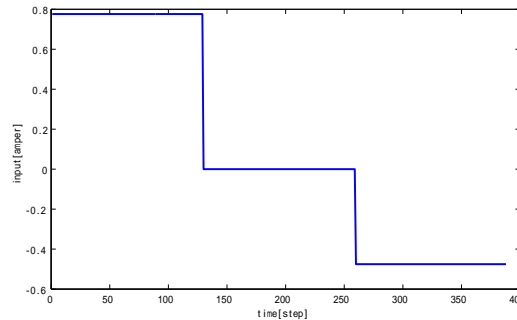


図 14: 生成した入力波形 (定常外乱を考慮した場合)

また、定常外乱と合わせた、実際にプラントに入力される波形およびプラントからの出力は図15,16のようになる。

4.4.2 消費エネルギーの評価

前項により求めた入力値を利用して、消費エネルギーの評価を行う。消費エネルギー W は本項目では次のように表される。

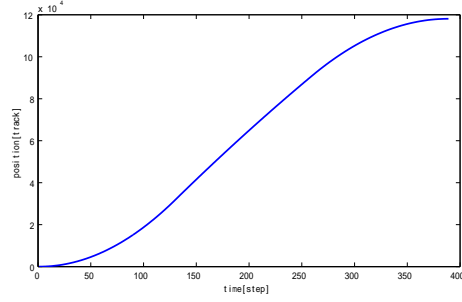
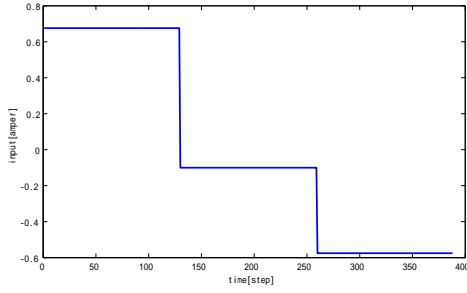


図 15: プラントへの入力 (定常外乱を考慮し 図 16: プラントからの出力 (定常外乱を考慮した場合)

$$\begin{aligned}
W &= \sum_{all} I^2 \\
&= I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3 \\
&= \frac{S_{all}^2}{2 \cdot S_1} \cdot Dist.^2 + \frac{L_{all}^2}{Gain^2} \cdot \frac{10^{-6}}{T_s^4} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)^2} \\
&= \frac{S_{all}^2 \cdot Dist.^2}{2} \cdot \frac{4 \cdot \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{1}{Dist.^2 \cdot S_{all}^2} + (S_{all} - S_1)^2}{S_1(S_{all} - S_1)^2} \quad (47)
\end{aligned}$$

上式より、 W が最小値を取る条件は次式で表される。

$$\frac{\partial W}{\partial S_1} = 0 \quad (48)$$

$$(S_{all} - S_1)^3 = 4 \cdot \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{1}{Dist.^2 \cdot S_{all}^2} \cdot (3 \cdot S_1 - S_{all}) \quad (49)$$

この式は S_1 に関して 1 つの実数解と 2 つの虚数解を持つ。うち 1 つの実数解が、ある S_{all} に対して消費エネルギーを最小化する S_1 となる。

ただし、上式より $Dist. > 8 \cdot \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{1}{S_{all}^2}$ を超えるような定常外乱が発生する場合には、 $S_1 = \frac{1}{2} \cdot S_{all}$ となる S_1 が最小の消費エネルギーをとる S_1 となる。

たとえば、 $Dist. = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ の 5 通りの場合で、 S_1 を変化させたときの消費エネルギーのグラフの比較を図 17 に示す。ただし、最小値がどこかわかりやすくするため、 $110 \leq S_1$ の範囲を表示させている。外乱が増えていくと最小値をとる S_1 が大きくなっているのがわかる。しかし、本項の初めに計算した、外乱を補償する入力を与える場合の消費エネルギーの式 (64) と比較すると、

$$W(\text{外乱を補償する}, S_1 = S_3) = S_{all} \cdot Dist.^2 + \frac{L_{all}^2}{Gain^2} \cdot \frac{10^{-6}}{T_s^4} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)^2} \quad (50)$$

$$W(\text{外乱による減速を考慮}, S_1 = S_3) = \frac{S_{all}^2}{2 \cdot S_1} \cdot Dist.^2 + \frac{L_{all}^2}{Gain^2} \cdot \frac{10^{-6}}{T_s^4} \cdot \frac{1}{S_1(S_{all} - S_1)^2} \quad (51)$$

のようになるが、 $\frac{S_{all}}{2 \cdot S_1} \geq 1$ より、外乱による減速を考慮する場合の方が消費エネルギーが高いことがわかる。これは、 $S_1 = S_3$ の拘束条件を加えてあることが原因であると考えられる。

前項および本項を踏まえて、次項では S_1 および S_3 をフリーパラメータとして扱い、その入力値と消費エネルギーを考察する。

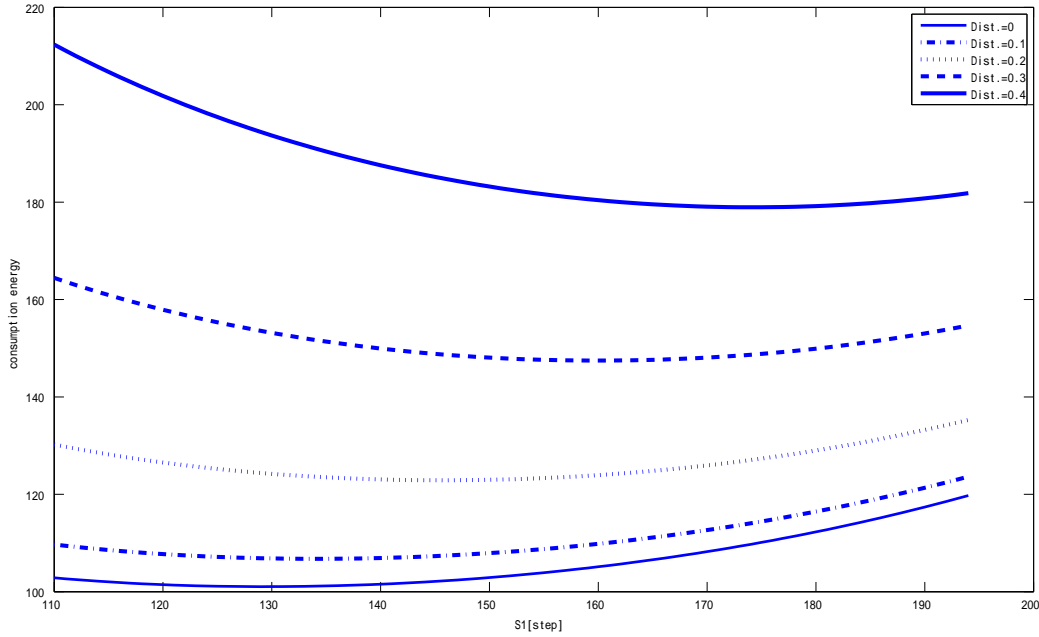


図 17: 定常外乱を考慮して、S1 を変化させたときの消費エネルギー（外乱の値による比較）

4.5 外乱を考慮し、加速時間と減速時間を独立に動かした場合

シーク動作の加速時間と減速時間をそれぞれが独立に設定できるようにし、その場合での消費エネルギーが最小となるような S_1 および S_3 の組み合わせを決定する。加えて、定常外乱を考慮に入れた計算方法を提案する。

4.5.1 フルストロークシークにおけるシーク軌道生成 (4)

外乱を $Dist.$ とし、加速時の入力を I_+ 、減速時の入力を I_- とすると、位置条件、速度条件により以下の式が導出される。

$$0 = 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) + 1000 \cdot (-Dist.) \cdot (T_s \cdot S_2) + 1000 \cdot (I_- - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_3) \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{L_{all}}{Gain} = & 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1)^2 + 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) \cdot (T_s \cdot S_2) \\ & - 1000 \cdot \frac{1}{2} \cdot Dist. \cdot (T_s \cdot S_2)^2 + 1000 \cdot ((I_+ - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_1) + (-Dist.) \cdot (T_s \cdot S_2)) \cdot (T_s \cdot S_3) \\ & + 1000 \cdot \frac{1}{2} \cdot (I_- - Dist.) \cdot (T_s \cdot S_3)^2 \quad (53) \end{aligned}$$

これより、入力値は次のようになる。

$$I_+ = Dist. \cdot \frac{S_{all}(S_{all} - S_3)}{S_1(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)} + \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2} \cdot \frac{2}{S_1(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)} \quad (54)$$

$$I_- = Dist. \cdot \frac{S_{all}(S_{all} - S_1)}{S_3(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)} - \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2} \cdot \frac{2}{S_3(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)} \quad (55)$$

これは、 $Dist. = 0, S_1 = S_3$ とすることで、最初に導出したものとの整合性がとれる。
 また、最大速度は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 V &= 1000 \cdot (I_+ - Dist.) \cdot S_1 \cdot T_s \\
 &= 1000 \cdot (Dist. \cdot \frac{(S_{all} - S_1 - S_3)(S_{all} - S_1)}{(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)} + \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s} \cdot \frac{2}{(2 \cdot S_{all} - S_1 - S_3)}) \quad (56)
 \end{aligned}$$

実際に作成した入力を 0 次ホールドで連続系に直したもの、および定常外乱を合わせて実際に入力される波形と、プラントからの出力をそれぞれ図 18、19、20 に示す。ただし、 $S_1 = 120, S_3 = 180, Dist. = 0.2$ として計算を行った。作成した波形の見目は、前項 2 つの波形を組み合わせたも

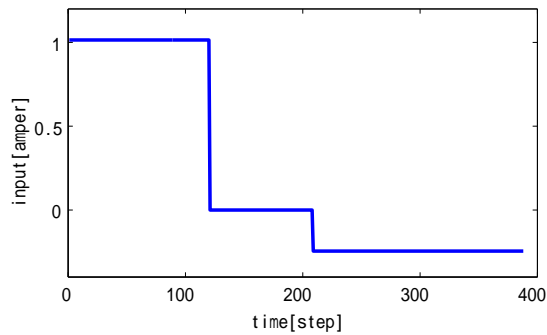


図 18: 生成した入力波形 (定常外乱を考慮した場合)

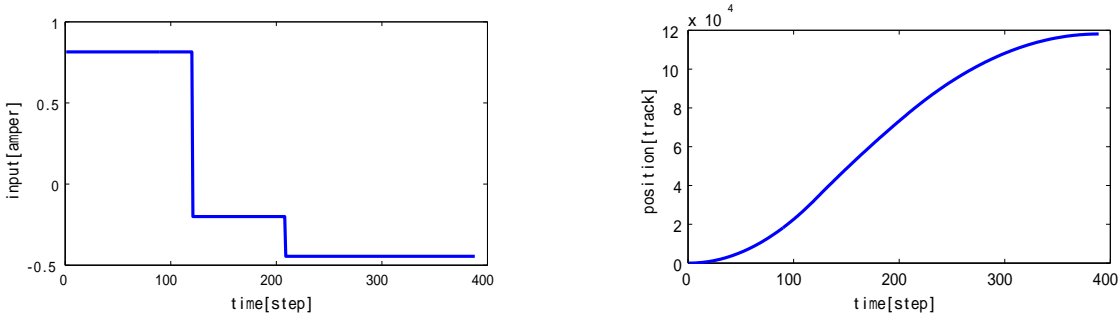


図 19: プラントへの入力 (定常外乱を考慮し 図 20: プラントからの出力 (定常外乱を考慮した場合)

のとなっている。

4.5.2 消費エネルギーの評価

消費エネルギーは入力値を用いて次のように表される。

$$W = \sum_{all} I^2 = I_+^2 \cdot S_1 + I_-^2 \cdot S_3 \quad (57)$$

$$\begin{aligned}
= & \frac{1}{(S_{all} - S_1 - S_3)^2} \cdot ((S_{all}^2 \cdot Dist.^2) \cdot \frac{S_3 \cdot (S_{all} - S_3)^2 + S_1 \cdot (S_{all} - S_1)^2}{S_1 \cdot S_3} \\
& + 4 \cdot S_{all} \cdot Dist. \cdot \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2} \cdot \frac{S_3 \cdot (S_{all} - S_3) + S_1 \cdot (S_{all} - S_1)}{S_1 \cdot S_3} \\
& + 4 \cdot \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{S_1 + S_3}{S_1 \cdot S_3}) \quad (58)
\end{aligned}$$

これを、 $1 \leq S_1 \leq S_{all}$ 、 $1 \leq S_3 \leq S_{all}$ 、 $S_1 + S_3 \leq S_{all}$ の拘束条件を与え、 $Dist. = 0.2[amper]$ として計算したグラフが図 21 の三次元グラフである。ただし、最小値が見えるよう、 $60 < S_1 < 288, 60 < S_3 < 288$ の範囲のみを示す。次のグラフでは MATLAB での計算の都合上 $S_1 + S_3 > S_{all}$ となる部分も含まれているが、これ以後の計算では除外している。実際に最小値が存在することがわかる。最小

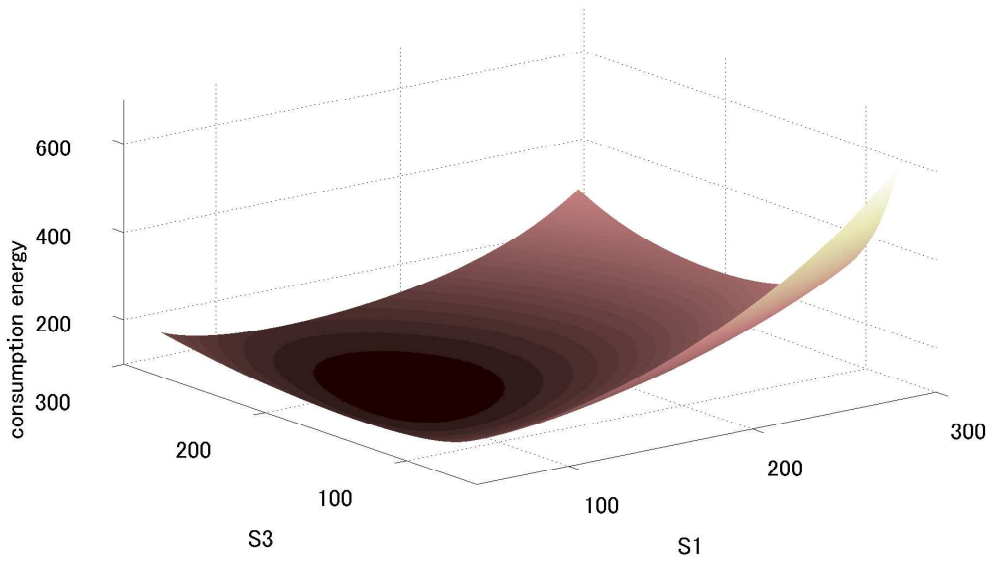


図 21: 外乱による減速を考慮し、S1 と S3 を変化させたときの消費エネルギー

点が実行可能領域に含まれることがわかったので、この最小点および最小値を求めるために次の連立方程式を解くことを考えた。

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial W}{\partial S_1} \\
= \frac{1}{S_3 S_1^2 (-2 S_{all} + S_1 + S_3)^3} \\
\cdot (-Dist.S_{all}^2 + Dist.S_{all} S_3 - 2 A) \\
\cdot (-Dist.S_{all} S_3^3 + (3 Dist.S_{all}^2 - 3 Dist.S_{all} S_1 + 2 A) S_3^2 \\
+ (-2 Dist.S_{all}^3 + 3 Dist.S_{all}^2 S_1 - 4 A S_{all} + 6 A S_1) S_3 \\
- 2 S_1^2 Dist.S_{all}^2 + 2 S_1^3 Dist.S_{all} + 4 S_1^2 A) \\
= 0 \\
\\
\frac{\partial W}{\partial S_3} \\
= \frac{1}{S_1 S_3^2 (-2 S_{all} + S_1 + S_3)^3} \\
\cdot (Dist.S_{all}^2 - Dist.S_{all} S_1 - 2 A) \\
\cdot (S_1^3 Dist.S_{all} + (3 Dist.S_{all} S_3 - 3 Dist.S_{all}^2 + 2 A) S_1^2 \\
+ (2 Dist.S_{all}^3 - 4 A S_{all} - 3 Dist.S_{all}^2 S_3 + 6 A S_3) S_1 \\
+ 2 Dist.S_{all}^2 S_3^2 - 2 Dist.S_{all} S_3^3 + 4 A S_3^2) \\
= 0
\end{array} \right. \quad (59)$$

ただし、 $A = \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}$ としている。この式から直接解を求めるのは大変難しいといえる。よって、次に示すように、外乱がない場合の最小点を基準に、外乱によるズレを求めるように方針を決めた。

$$\left\{ \begin{array}{l}
S_1 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} + f(Dist.) \\
S_3 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} + g(Dist.)
\end{array} \right. \quad (60)$$

しかし、式 (59) を見直すと、 S_1, S_3 の間にある程度の対称性が見られる。これを利用するために、次のように式を修正する。

$$\left\{ \begin{array}{l}
S_1 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} + f(Dist.) \\
S_3 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} - f(Dist.)
\end{array} \right. \quad (61)$$

こうして設計した S_1, S_3 を式 (59) に代入すると、次のような簡単な形になる。

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial W}{\partial S_1} \\
= \frac{9}{8} \frac{(2 Dist.S_{all}^2 + 3 Dist.S_{all} f(Dist.) + 6 A)(Dist.S_{all}^3 - 18 A f(Dist.))}{S_{all}^2 (-S_{all} + 3 f(Dist.))(S_{all} + 3 f(Dist.))^2} \\
= 0 \\
\\
\frac{\partial W}{\partial S_3} \\
= \frac{9}{8} \frac{(-2 Dist.S_{all}^2 + 3 Dist.S_{all} f(Dist.) + 6 A)(Dist.S_{all}^3 - 18 A f(Dist.))}{S_{all}^2 (-S_{all} + 3 f(Dist.))^2 (S_{all} + 3 f(Dist.))} \\
= 0
\end{array} \right. \quad (62)$$

ただし、 $A = \frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}$ である。この式を解くと $f(Dist.) = \frac{1}{18} \cdot \frac{Dist.}{\frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}} \cdot S_{all}^3$ となり、 S_1, S_3 は次のように表される。

$$\begin{cases} S_1 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} + \frac{1}{18} \cdot \frac{Dist.}{\frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}} \cdot S_{all}^3 \\ S_3 = \frac{1}{3} \cdot S_{all} - \frac{1}{18} \cdot \frac{Dist.}{\frac{L_{all} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}} \cdot S_{all}^3 \end{cases} \quad (63)$$

この結果より、定常外乱による減速を考慮する場合でもその消費エネルギーを最小化するステップ数は解析的に求められることがわかる。こうして最適化された消費エネルギーは式 (64) で表される。

$$W_{min} = \frac{9}{8} \cdot S_{all} \cdot Dist.^2 + \frac{L_{all}^2 \cdot 10^{-6}}{Gain^2 \cdot T_s^4} \cdot \frac{1}{\frac{2}{27} \cdot S_{all}^3} \quad (64)$$

5 定常外乱を考慮した場合の消費エネルギーの比較

本報告で提案した入力波形生成法のうち、消費エネルギーの比較のため次の項目の消費エネルギー最小値を比較する。

1. S_1, S_3 をフリーパラメータとして扱い、定常外乱による減速を考慮した軌道設計
2. S_1, S_3 をフリーパラメータとして扱い、定常外乱を余剰な入力により補償する軌道設計

次の図 22 は、 S_{all} を変化させ、それぞれの S_{all} に対する消費エネルギー最小値を示したものである。ただし外乱 $Dist. = 0.2[amper]$ として計算している。(2) の、定常外乱を余剰な入力により補償

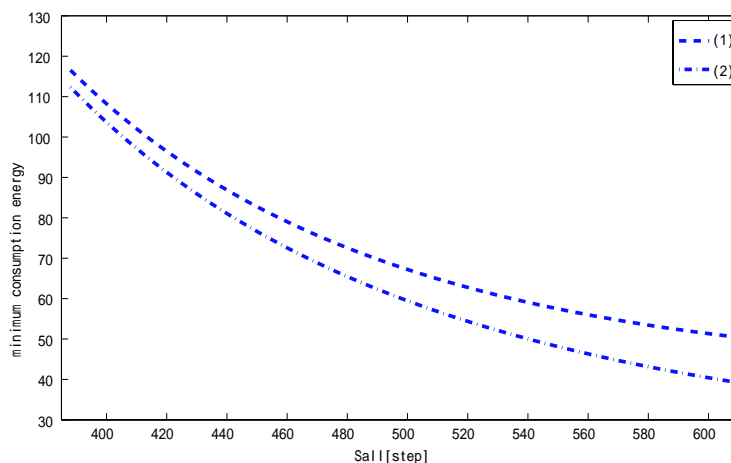


図 22: Sall を変化させたときの最小消費エネルギーの遷移

する場合と比べて、(1) の外乱による減速を考慮した場合は消費エネルギーの最小値が上昇している。余剰な入力により外乱補償をしているにも関わらず、消費エネルギーが最も小さくなるという結果となった。

これは、外乱による減速を考慮した結果、補償する場合に比べて余分な加速が必要になり、その結果消費エネルギーが増加してしまったと考えられる。図(23)にそれぞれの生成波形と速度、および入力二乗を比較したグラフを示す。

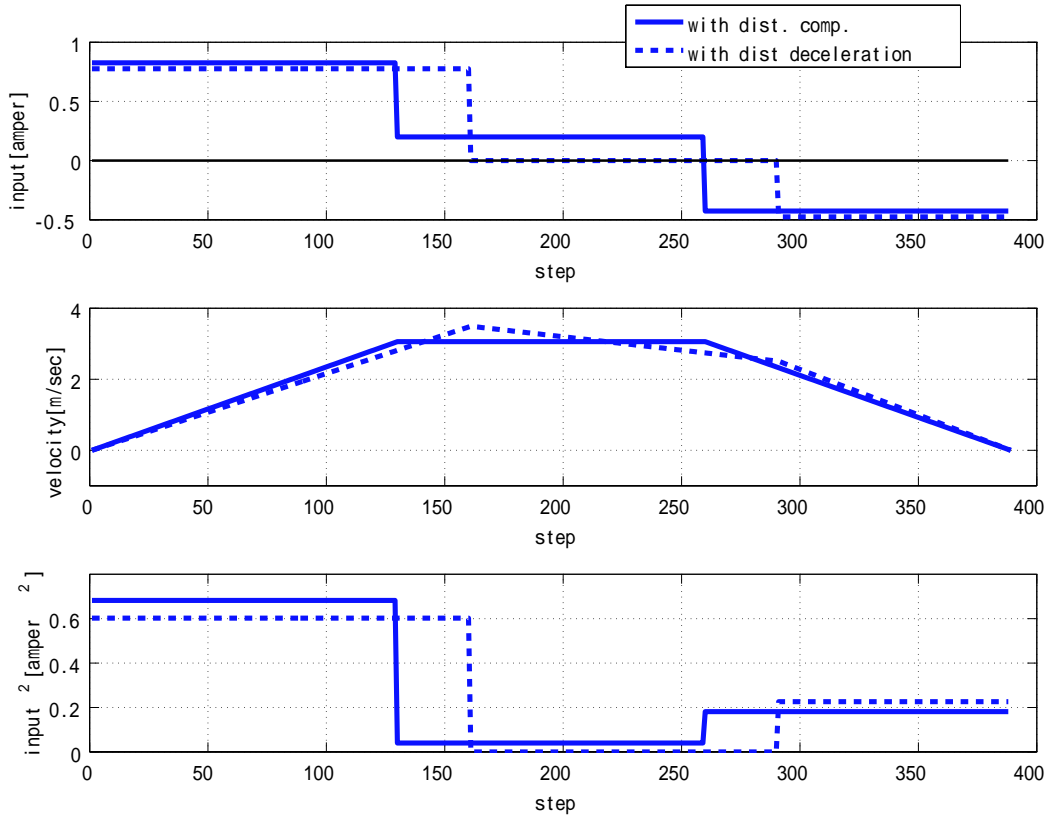


図 23: 入力波形, 速度, 入力波形の二乗の比較

入力値の比較で明らかなように、外乱による減速を考慮した場合は、加速時間が増加している。その差が消費エネルギーにどれだけ関わるかというのは、入力波形の二乗の比較を見ると、確かに大きく差が出ている。また、速度の比較からも明らかなように、外乱による減速を考慮した場合は余分な加速を施している。

数式で消費エネルギーを比較すると、式(41), 式(64)より、その差は式(65)で表される。ただし、 $A = \frac{L_{air} \cdot 10^{-3}}{Gain \cdot T_s^2}$ である。

$$\begin{aligned}
 W_{diff} &= W_{withDistComp.} - W_{withDistDeceleration} \\
 &= S_{all} \cdot Dist.^2 + A^2 \cdot \frac{1}{\frac{2}{27} \cdot S_{all}^3} \\
 &\quad - \frac{9}{8} \cdot S_{all} \cdot Dist.^2 - A^2 \cdot \frac{1}{\frac{2}{27} \cdot S_{all}^3} \\
 &= -\frac{1}{8} \cdot S_{all} \cdot Dist.^2
 \end{aligned} \tag{65}$$

これより、外乱を補償する場合のほうが消費エネルギーが小さいことがわかる。

6 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、磁気ディスク装置のシーク動作について、その省エネルギーを考えた制御を提案した。具体的には、ディスクの回転を考慮したシーク時間決定法 “just-in-time 理論” を用いることを前提とした計算方法を提案した。任意のシーク時間とシーク距離が与えられたとき、その消費エネルギーが最小となるようなシーク軌道を決定することである。

本提案手法では、VCM への入力波形を図 4 のような単純な波形に限定することで、可変となるシーク時間およびシーク距離に対応している。ある一定の時間内で目標位置に到達するために、加速時間および減速時間、加速入力および減速入力を、消費エネルギーが最小になるように設定することが目的である。この点において、本論文では、加速時間 S_1 および減速時間 S_3 が決定すれば、加減速の入力および最大速度、消費エネルギーが算出できるような計算方法を考え、その解析を行った。

まず、定常外乱を考慮せず計算を行った場合には、加速時間および減速時間は、それぞれシーク時間全体の $\frac{1}{3}$ とする場合は最も消費エネルギーが少なくなることがわかった。この結果は直感的に考え付く結果、つまり全体の $\frac{1}{2}$ だけ減速・加速を行う場合とは異なっており、興味深い結果が導き出せた。

次に、定常外乱を考慮した場合で、外乱を補償するような入力を余剰に追加する場合と、外乱による減速を考慮する場合の二通りを考えた。計算の簡単のために拘束条件、本論文の場合では $S_1 = S_3$ という拘束条件を与えたが、そのような条件を与えると、外乱を補償する場合よりもかえって消費エネルギーが大きくなってしまったということがわかった。その消費エネルギーをさらに低下させるために、 S_1, S_3 をフリーパラメータとして計算を行い、 S_1, S_3 の対象性を考慮することでその解析解を求めることができた。

最後に、それぞれの場合について消費エネルギーを比較した。その結果、エネルギー外乱による減速を考慮する場合よりも、外乱を補償する入力を与えた場合の方が消費エネルギーは小さくなることがわかった。

6.2 今後の課題

本論文において、その計算では VCM が出力可能な速度、および入力可能な電流値を考慮せずに計算を行っている。よって、まず第一の課題としてあげられるのは、速度制限および入力制限が与えられたときの計算方法を考えることである。この点に関しては、非線形計画法 [7] などにより数値的に解が求められることは判明しているが、計算に時間がかかるので、制限を加えた場合でも解析的に求められることを目標に、数値解を元にして様々な検討をしてきたが、その解析的な解を求めるには至らなかったことを言及しておく。

参考文献

- [1] M. Hirata, T. Hasegawa, K. Nonami : Short Track-Seeking Control of Hard Disk Drives by Using Final-State Control, IEEJ Trans. , Vol. 125, No. 5, pp.524-529 (2005) 平田 光男, 長谷川 辰紀, 野波 健蔵: “ 終端状態制御によるハードディスクのショートシーク制御 ”, 電学論D, Vol. 125, No. 5, pp.524-529 (2005)
- [2] Byung-Hoon Chang, Hori, Y. :Trajectory design considering derivative of jerk for head-positioning of disk drive system with mechanical vibration, Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, Vol.11, Issue. 3, pp.273-279 (2006)
- [3] ナノスケールサーボ制御 高速・高精度に位置を決める技術, 山口高司, 平田光男, 藤本博志 編著, 東京電機大学出版局,2007
- [4] Jonathan W. Haines, Frank W. Bennett,U.S.Patent,US6310743:SEEK ACOUSTICS REDUCTION WITH MINIMIZED PERFORMANCE DEGRADATION,2001
- [5] Xiao Zhang, Hyung-Ki Hong, Chang-Ik Kang,U.S.Patent,US6038096:ADAPTIVE SECTOR SEEKING METHOD FOR REDUCING DISK DRIVE POWER CONSUMPTION,2000
- [6] ハード・ディスク装置の構造と応用, 岡村博司,CQ 出版社,2002
- [7] 工学基礎 最適化とその応用, 矢部博, 数理工学社,2006