

音響デバイスとしてのモータ制御システムの開発

TAKEKOSHI, Takaaki / 竹腰, 貴成

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

修士論文

音響デバイスとしての
モータ制御システムの開発

2010 年度
システム工学(システム系)専攻

09R6113
竹腰 貴成

指導教授 小林 一行 教授

Development of motor control system as sound device

Takaaki TAKEKOSHI

Abstract

Electric motors are widely used in many home electric system that produce actuating task such as home appliance vacuum cleaner. The main problems for vacuum cleaner is large noise when at high-speed rotation. Therefore many researchers and companies are developed new technology for suppressing motor noise. Generally speaking, it is very difficult to suppress noise, since the motor noise is generated by various factors. In this paper, we focus on characteristics of human perception from ears. Instead of suppress motor noise, we control motor noise spectrum according to human perception. To control motor noise spectrum, motor control driver that may control motor rotational speed and motor noise spectrum independently is necessary. In order to confirm the basic idea of proposed motor control driver, we develop basic prototype and validate simple experiments.

Key Words : Motor, Human perception, noise control

目次

第1章	はじめに	5
1.1	研究背景	5
1.2	過去の研究	5
1.3	近年の研究の観点	6
1.4	本研究の目的	6
第2章	モータから生じる騒音	7
2.1	振動による生じる騒音	7
2.1.1	広帯域騒音	7
2.1.2	内部共鳴騒音	8
2.2	磁励音	9
第3章	提案するモータ制御システム	10
3.1	磁励音の利用	10
3.2	提案するモータ制御システム	11
3.3	提案するシステムにおいて、発生し得る問題点	12
第4章	実験結果、及び考察	13
4.1	入力信号の周波数によるモータ騒音の周波数特性	13
4.1.1	実験概要	13
4.1.2	高速フーリエ変換	15
4.1.3	実験装置	17
4.1.4	実験結果	19
4.2	入力信号周波数による回転速度の変化	21
4.2.1	実験概要	21
4.2.2	実験装置	22
4.2.3	実験結果	23
4.3	入力信号周波数による、回転速度、及びシステム内電流の変化	25
4.3.1	実験概要	25
4.3.2	実験結果	26
4.4	入力信号周波数によるモータトルクの変化	27
4.4.1	実験概要	27
4.4.2	モータトルクの計測方法	28
4.4.3	実験装置	29
4.4.4	実験結果	31

4.5 回転速度を一定にするためのデューティ比の制御.....	32
4.5.1 実験概要.....	32
4.5.2 最小二乗法.....	32
4.5.3 実験結果.....	34
第5章 おわりに.....	35
参考文献.....	36
謝辞.....	37
付録.....	38

第1章 はじめに

1.1 研究背景

モータは電圧の制御により自由な回転動作を得られるため、工業用の大規模な機械から玩具に至るまで広く利用されている。

身近な例として家庭用の掃除機を挙げると分かりやすいが、モータは動力を発生させることにより、振動や摩擦が必ず発生し、騒音を生み出す。近年は、様々な機器の小型・軽量化、環境対策の意識の高まりの双方から、モータの需要は伸び続けており、同時に騒音へ配慮した取り組みや研究も増加している。

そこで以前より、モータのハード面においては駆動音の抑制・静音化の技術の開発^[1]、及び、ソフト面における高調波の抑制等による静音化のシステムの研究・開発^{[2][3]}が進められている。

1.2 過去の研究

モータから発生する種々の騒音は、動力を得る過程で発生した微細な振動が空気などを伝わり、人間の耳に届くことで音として現れている。そこで、摩擦を減少させるための軸受けや潤滑油の研究が行われている。また、振動を抑制するために、筐体の剛性を高める材料・部品の開発が広く取り組まれている。

1.3 近年の研究の観点

上記のように多くの機関・研究者がモータの騒音に関する研究に取り組んでいるが、その大部分は静音化のみに視点がおかれている。騒音の発生要因は多岐に渡るため、静音化だけを行うことは非常に難しい。また、動力を発生させるというアクチュエータの特性上、騒音を完全に消滅させることは不可能だと考えられる。

そこで、近年のモータの騒音抑制に関する研究においては、快音化という手法を目的とした研究が取り組まれている。これは、騒音を減少または消滅させる静音化に対し、騒音の周波数などを変化させることで体感での騒音の大きさを変化させるものである。その手法の一例としては、発生する騒音の周波数を人間の可聴外周波数に変化させるものがある。これにより、人間の耳にとって聞こえにくくすることを目的としたものである。

1.4 本研究の目的

本研究では、モータが、磁石とコイルによる動作によって音を発生させるというダイナミックスピーカの特性に着目する。これにより、モータから発生する騒音をスピーカのよ

うに自由に変化させることで、単一で耳障りな騒音から遠ざける快音化の手法を図る。

上記の手法から、本研究では、回転に加えて任意の音を発生させるモータ制御システムの開発を目的とする。

第2章 モータから生じる騒音

2.1 振動による生じる騒音

モータの回転によりモータ自体から発生する騒音として、広帯域騒音・内部共鳴騒音の2つが挙げられる。

2.1.1 広帯域騒音

モータの駆動により、モータ自体が振動することで発生する騒音である。この騒音は他の騒音に対して比較的低い音圧が確認されるが、**Fig.1** の例に示すように非常に広範囲の周波数で発生する。

また、入力する信号の周波数による音響加振力の変化が小さい。そのため、入力信号の内容に変化を加えても、騒音の音圧・周波数に影響を及ぼしにくい。

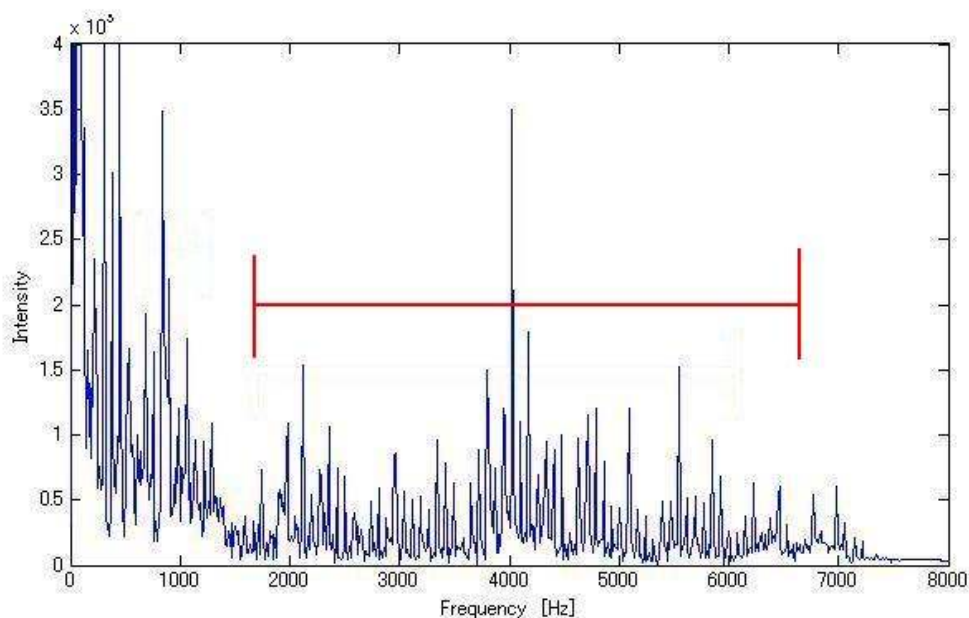


Fig.1 Example of sound pressure by motor(a)

2.1.2 内部共鳴騒音

筐体内部の共鳴周波数により現れる騒音である。この騒音は狭い周波数帯域において現れやすい。また、音圧は広帯域騒音に比べて高くなりやすい。また、広帯域騒音と同様に、入力信号の変化による騒音への影響は小さい。

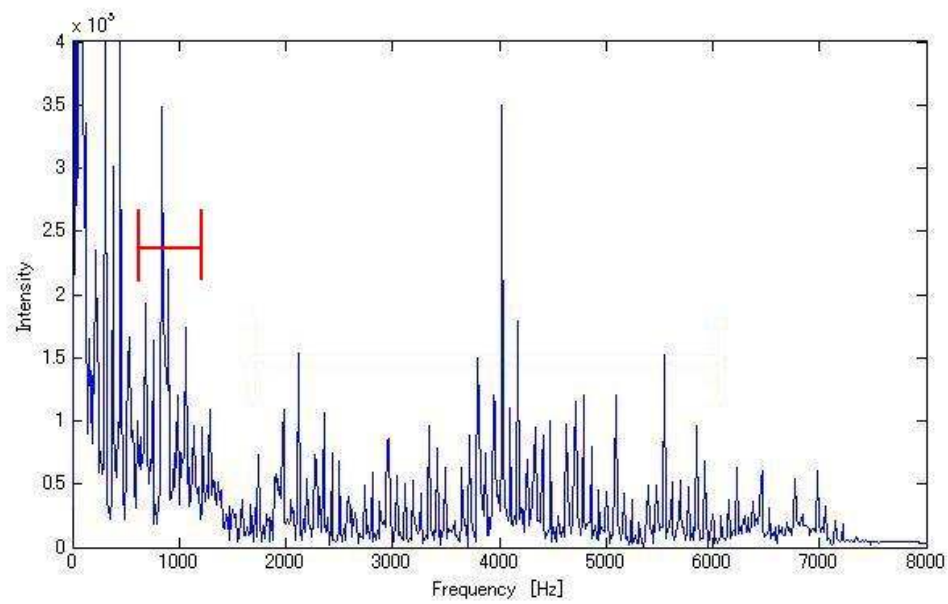


Fig.2 Example of sound pressure by motor(b)

2.2 磁励音

磁性体には、交番磁界を加えた際にわずかに膨張・収縮する特性がある。この性質は磁歪と呼ばれる。モータの制御には、熱損失が少なく安定した制御を行うため、定電圧可変周波数、もしくは可変電圧可変周波数の電源により、実効値として電圧を取りだす制御方式が多く用いられている。それが磁歪を発生させ、磁歪の体積変化が空气中を伝わって耳に届き、磁励音と呼ばれる騒音となっている。また、磁歪による体積変化率は元の体積の $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 程度である。そのため、磁歪を意図的に発生させた場合であっても、磁歪が材料損傷や破壊の原因になる可能性は非常に低い。

磁励音は、音圧が高い上に、単一周波数で発生し易く、とても耳障りになることが多い騒音である。そして、広帯域騒音・内部共鳴騒音とは違い、モータを構成する部品等による影響が小さい。しかし、入力する信号に強く起因する。そのため、モータの構造に関係なく、外部からの制御のみによって大きく変化させることが可能である。

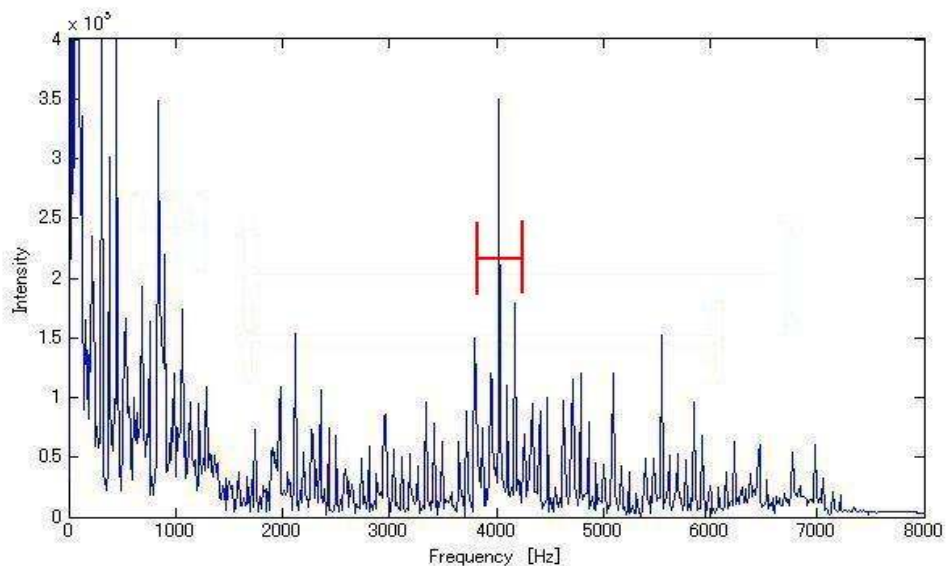


Fig.3 Example of sound pressure by motor(c)

第3章 提案するモータ制御システム

3.1 磁励音の利用

本研究では、磁励音が入力信号の影響を大きく受けることに着目する。

モータは、使用されている機器の大部分において定常回転を行っている。そのため、磁励音は、非常に狭い周波数範囲の単一周波数成分として現れやすい。

そこで、微細な時間変化を繰り返す音声や楽曲などの音響信号をモータに入力する場合を考える。音響信号は、交流の電気信号となるため、モータに加えた場合には大きな速度変化をもたらすことがない。しかし、短時間的に見れば微細な電圧変化を繰り返し、周波数も一定ではない。そのため、音響信号をモータに入力することで、磁励音の周波数成分を分散させることができる。加えて、内部共鳴騒音の音圧も低減させることが可能である。

また、磁励音により発生する騒音の周波数成分は、入力する信号の周波数の時間変化によって自由に変動させることができると考えられる。これにより、音響信号をモータに入力した際には、磁励音が音声や楽曲のように聞こえると考えられる。

3.2 提案するモータ制御システム

モータからの磁励音を変化させるための信号を作成する。作成するシステムの流れを Fig.4 に示す。

まず Fig.4 上部に示す高周波信号入力部に、入力音声・楽曲等を電圧変化に直した信号を入力する。同時に、Fig.4 下部に示すモータ駆動信号入力部に、モータの駆動を制御する信号を入力する。Fig.4 中央部に示す信号合成部に両者を入力し、重畳させた信号を作成する。これにより、モータの長時間的な回転速度を変化させることなく、微細に回転速度を変化させることが可能となる。これを、磁励音を自由に変化させ、駆動しながら任意の音を発生させることが可能なシステムとして提案する。

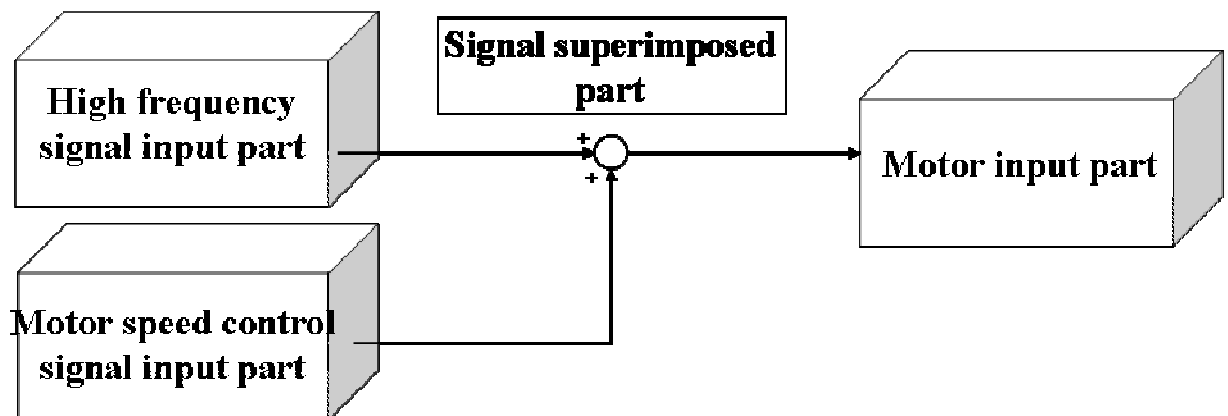


Fig.4 Block diagram of proposed motor control system

また、低電圧電圧可変周波数制御の制御方式を利用することで、高周波信号のみによってモータの回転速度も司ることが可能であると考えられる。小型のモータのように、低電圧低電流の信号のみで駆動可能なモータも存在する。その場合には、高周波信号を制御することのみで、回転速度、及び騒音を制御したいと考えている。

3.3 提案するシステムにおいて、発生し得る問題点

本システムの有効性・有用性を考えた場合において、想定される問題点を以下に挙げる。

(p1)入力信号の周波数と、発生する騒音の周波数の変化

(p2)入力信号の周波数の変化による、モータ性能の変化

本システムの開発に当たって、以上2点について解決していく必要がある。本件旧ではこれらの問題点を解決し、本システムの有効性を示すための実験を行った。その実験結果を次章において示す。

第4章 実験結果, 及び考察

4.1 入力信号の周波数によるモータ騒音の周波数特性

4.1.1 実験概要

まず, 提案するシステムの有効性を示す.

高周波信号をモータに入力した際に, 発生する騒音の変化を調べる実験を行った.

ファンクションジェネレータにより, 任意の周波数の矩形波を発生させ, モータドライバを介してそれをモータに入力し, モータから発生した騒音の解析を行う. 実験に用いた信号の情報を **Table 1** に示す.

Table 1 Signal specifications for experiments

Frequency band[Hz]	500 ~ 10000
Duty cycle[%]	50.00
Voltage[V]	12.00
Current[A]	0.25
Type	Square

今回の実験では 500Hz から 10000Hz まで, 500Hz 刻みに信号を作成し, 測定を行った.

信号のデューティ比は 50%, 電圧 12V, 電流は 0.25A に設定した.

発生した騒音の測定には、モータから発せられる音をマイクロフォンによって電気信号に変換し、そのデータを PC に取り込む。これを FFT 解析することで、発生した騒音の周波数特性を比較する。FFT 解析については後述する。

マイクにダイナミックマイクを用いた場合には、モータから発せられる電磁場の影響を受けやすくなるため、本研究ではコンデンサマイクを利用して測定した。モータからの音圧を大きくとるため、マイクとの距離を 5cm に設定した。

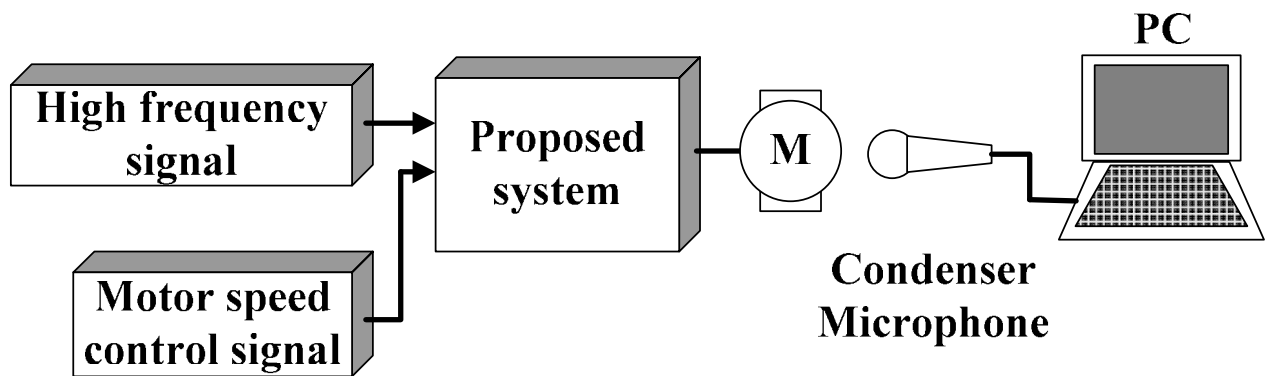


Fig.5 Measurement overview

4.1.2 高速フーリエ変換

録音したモータ騒音の解析には、行列等の計算を行うソフトウェアである MATLAB を用いた。その MATLAB 上にて、FFT(高速フーリエ変換)による解析を行った。

フーリエ変換とは、sin, cos 波を基本とし、同じ形を繰り返している周期を持った波形は、如何に複雑なものであろうとも複数の単純な波の合成であるという仮定をもとにした波形変換法である。上記仮定に従い、周期 T の任意関数 $f(t)$ を三角関数の級数和としてあらわすものである。主に周波数成分の抽出に用いられる。

信号 $f(t)$ ($-\infty < \omega < \infty$) のフーリエ変換 $F(\omega)$ は

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (-\infty < \omega < \infty) \quad (1)$$

で定義される。逆に $f(t)$ は $F(\omega)$ より次式で与えられる。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

これを逆フーリエ変換という。

フーリエ変換の特徴として可逆変換であるということが挙げられる。

つまり、変換した信号に処理を施し、処理後に逆変換を施すことが可能である。

しかし、計算機では連続量が扱えないため、そのままではフーリエ変換が使えない。そのため DFT(離散フーリエ変換)を用いる。

N 個のデータをサンプリングした離散時間信号 $f(t)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$) のフーリエ変換 $F(k)$ は

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot n}{N}\right)} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (3)$$

で定義され、逆 DFT は

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \cdot e^{j\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot n}{N}\right)} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

によって与えられる。しかし、DFT はデータ点数が N 個の場合、 N^2 回の計算が必要となる。これでは、処理に非常に多くの時間を要することになってしまう。

ここでデータ点数 N が 2^m 個の場合を考えると、 $e^{j\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot n}{N}\right)}$ の周期性を利用して

$$F(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2m) \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot n}{2N}\right)} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f(2m+1) \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot n}{2N}\right)} \quad (5)$$

と分解することができる。これだけでも計算回数は約半減できる。これをさらに 2 回、3 回、... と繰り返すことにより計算回数が減り、最終的には $N \log_2 N$ 回まで減らすことができるというアルゴリズムが FFT(高速フーリエ変換)である。計算結果を全く損なうことなく、大幅な計算時間の短縮が行える。

人間の平均可聴周波数帯域が 20~20000Hz であることから、本研究では、サンプリング周波数には 44100Hz を設定した。

4.1.3 実験装置

実験には、光学式エンコーダが付属した小型の直流モータ(以下、単にモータと呼ぶ)を用いた。以下に、使用したモータとその仕様を示す。



Fig.6 Motor used for experiments

Table 2 Motor specification

Rating						
Part number	Gear ratio	Output	Torque		Current	Speed
		W	N·m	kgf·cm	mA	r/min
RD0-37KE50G9A	9	7.4	0.17	1.8	1.5	400
		No load		Starting torque		
		Current	Speed	Torque		Current
		mA	r/min	N·m	kgf·cm	A
		0.34	477	1.1	12	7.2

以下に使用したモータドライバと、その仕様を示す。

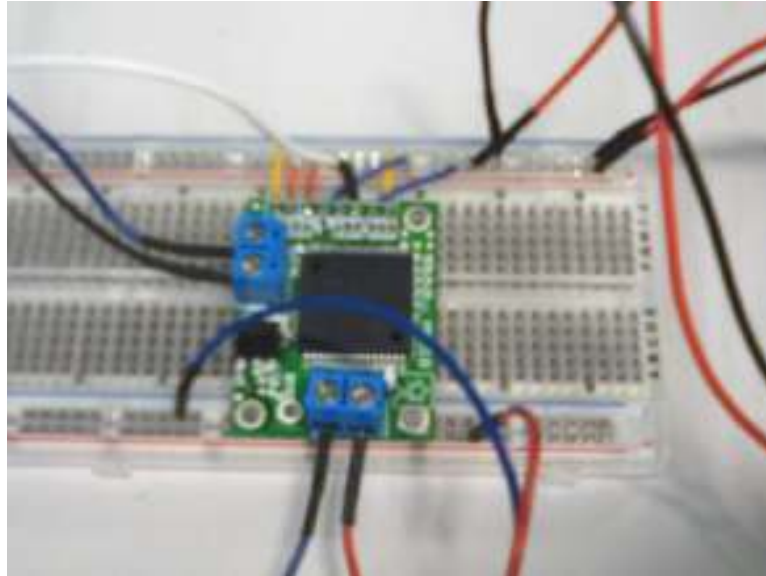


Fig.7 Motor driver used for experiments

Table 3 Motor driver specification

Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Operating supply voltage	5.5		36	V
Supply current(on)			15	mA
Supply current(off)			40	μ A
Output current			30	A
Reverse output current			-30	A
Case operating temperature	-40		150	$^{\circ}$ C
PWM frequency	0		10000	Hz
Turn-on delay time		100	300	μ s
Turn-off delay time		85	255	μ s
Output voltage rise time		1.5	3	μ s
Output voltage fall time		2	5	μ s

4.1.4 実験結果

録音した騒音を FFT 解析し，入力信号の周波数，発生した騒音の周波数，発生した騒音の各周波数成分の関係から 3 次元グラフを作成した．そのグラフを **Fig.8** に示す．

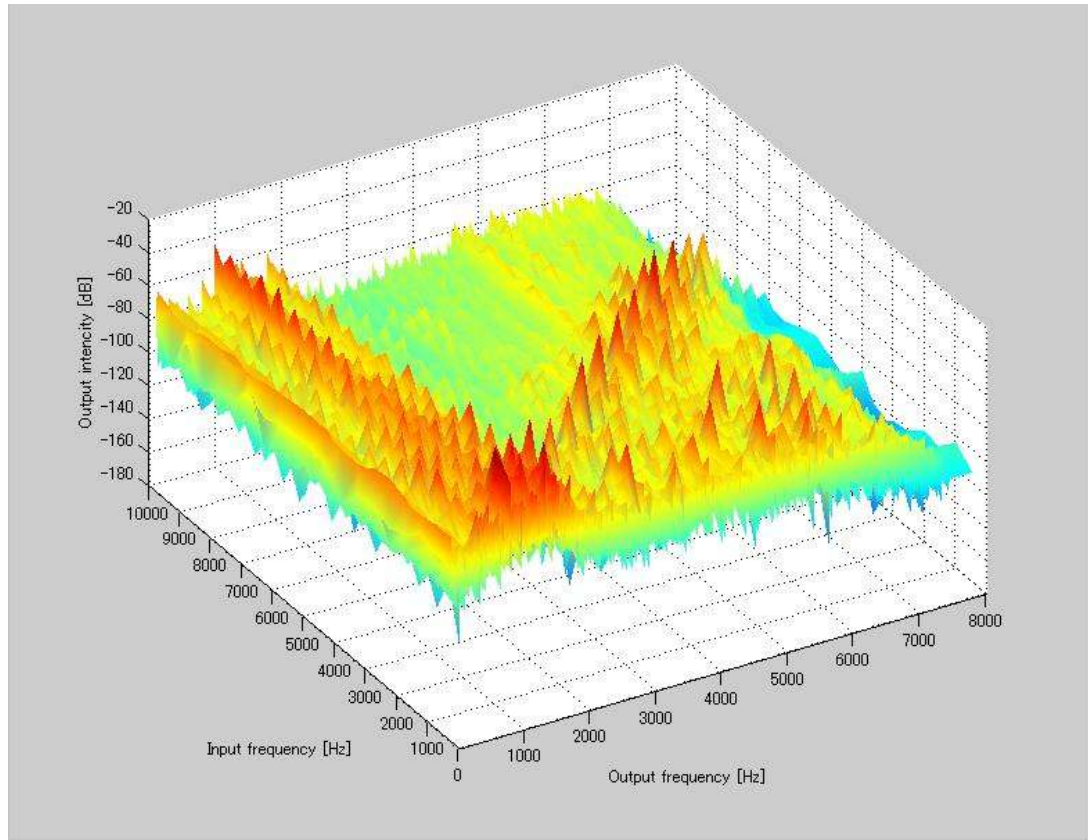


Fig.8 Frequency response of the motor noise by the frequency of the motor input signal

Fig.8 より，主に 2 種類の騒音が発生していることが確認できる．

1 つは，図中中央部に並ぶ入力周波数に対応した騒音のピークである．これは磁励音による騒音であり，同時にその騒音より高周波数部分のみに，その倍音によると思われる騒音を確認できている．

そして，もう 1 つは，入力した周波数に関係なく発生している約 1000Hz の騒音である．これは，入力した信号に因らず常に同程度の周波数と大きさを持っていることから，内部共鳴騒音と分かる．

この結果から，モータに高周波の信号を入力することで，その信号の状態に起因する磁励音を発生させることが可能であると分かる．また，発生した磁励音は入力した信号の周波数に直接追従していることから，任意の周波数の信号を作成し入力することで，モータから発生する騒音の周波数を意図的に変化させることが可能であるとわかる．

4.2 入力信号周波数による回転速度の変化

4.2.1 実験概要

4.1の実験により、モータに入力する信号の周波数のみで、モータから発生する騒音の周波数を大きく変化させることが可能であることが確認できた。続いて、このシステムの有効性を確かめるために、システムがモータの回転速度やトルクといった性能に影響を与えるかを確認する必要がある。

そこで、提案するシステムの有効性を確かめるための実験として、モータに高周波数の信号を入力した場合に、モータの回転速度に影響を与えるかどうかを確かめるための実験を行った。

4.2.2 実験装置

4.1の実験で用いた光学式エンコーダ一体型のモータを使用し、エンコーダからの出力を PSoC(Programmable System on Chip)マイコンによって計測及び表示を行った。デューティ比・電圧・電流は4.1の実験と同じ設定で行っている。実験に用いた PSoC マイコンを以下に示す。

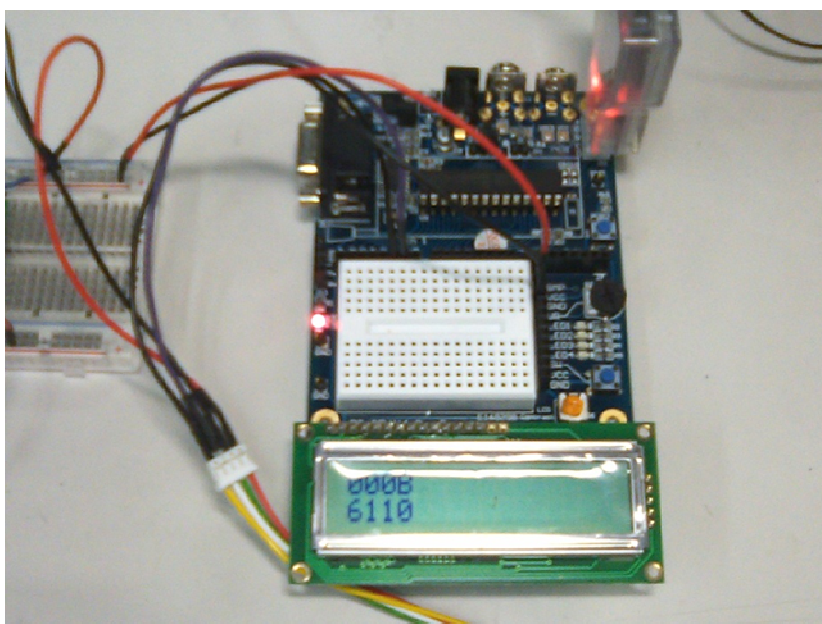


Fig.9 Frequency response of the motor noise by the frequency of the motor input signal

4.2.3 実験結果

入力した信号の周波数と計測された回転速度の結果を対数軸・線形軸の2種類のグラフに表した。

以下の Fig.10, Fig.11 にその結果を示す。

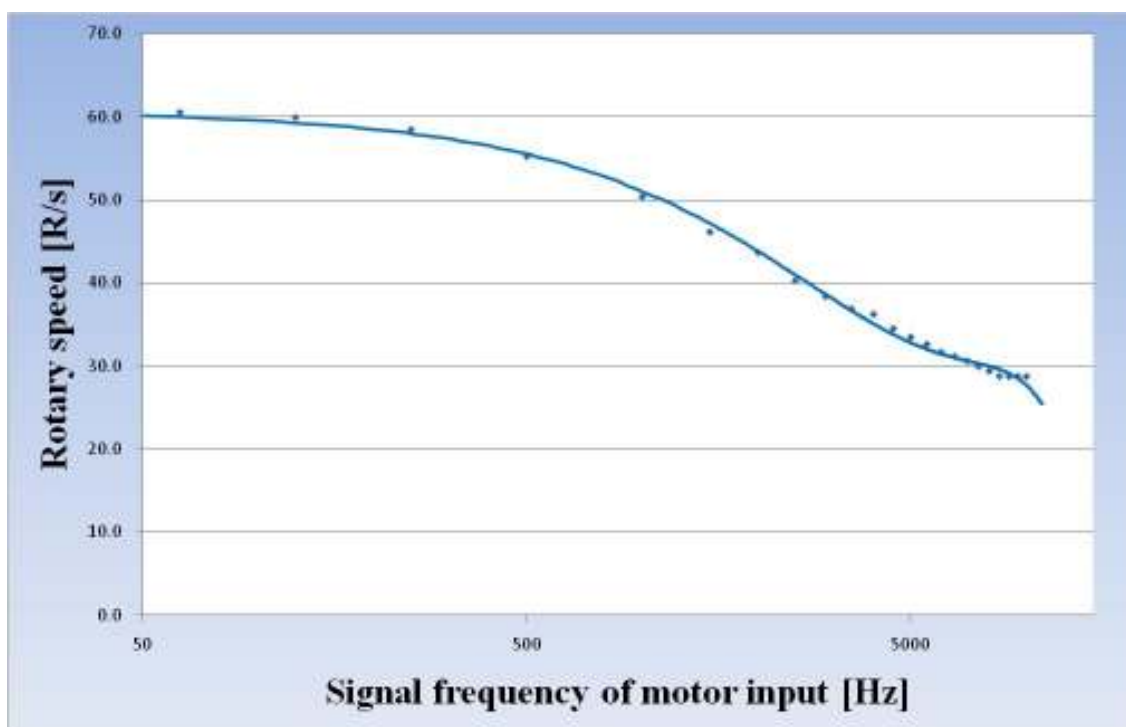


Fig.10 The rotary speed result of the motor by the input signal frequency in logarithm scale

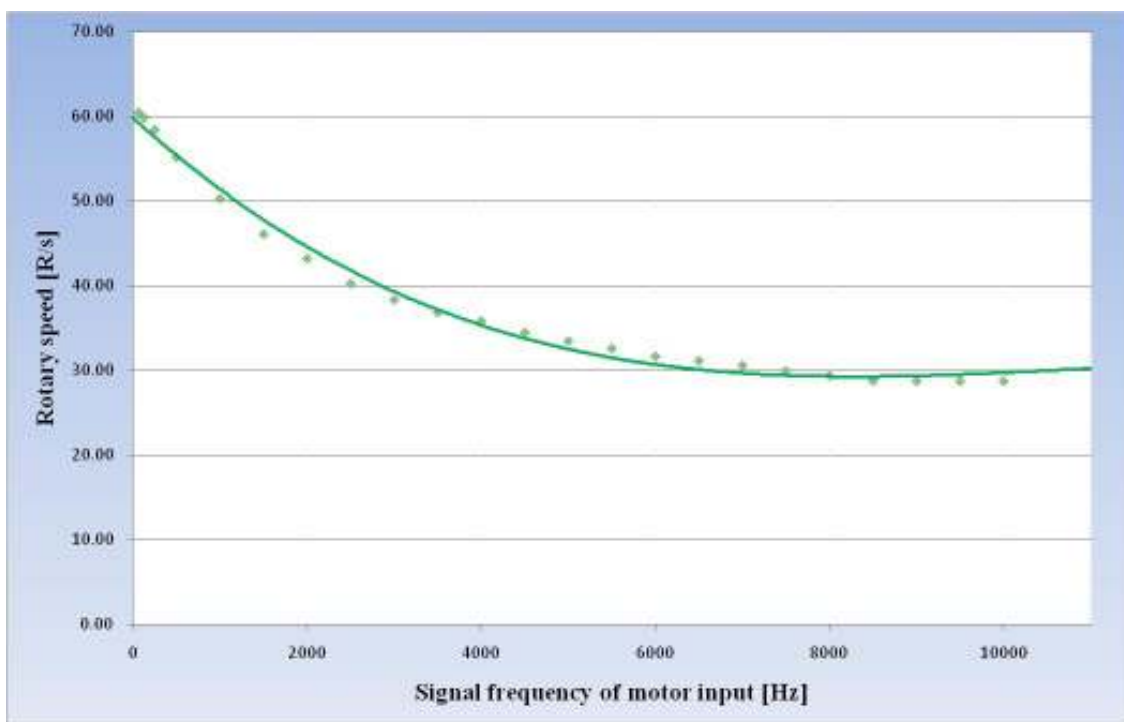


Fig.11 The rotary speed result of the motor by the input signal frequency in linear scale

両図から、入力信号の周波数を上昇させると、同時に回転速度が低下していることが分かる。周波数を変化させることで回転速度が変化してしまっているのは、本研究の目的として有効ではない。しかし、エンコーダからパルスを加算するマイコン上のプログラムの処理速度を 100Hz に設定していたため、高周波数の入力時にはモータの回転速度の変化が激しくなり、マイコンの処理が追い付いていない可能性が考えられる。

4.3 入力信号周波数による、回転速度、及びシステム内電流の変化

4.3.1 実験概要

続いて、4.2の実験にて、入力周波数に応じて回転速度が減少してしまう結果が表れたのは、マイコン上のプログラムの処理速度が追い付いていないのか、提案するシステムに問題があるためか確認するための実験を行った。

電圧や実験を行う信号の周波数等は 4.2 と同様の条件を用いた。但し、マイコン上のプログラムの変更により、エンコーダからのパルスを計測するプログラムの処理速度を大幅に引き上げ、20000Hz に設定して実験を行った。また、今回は同時に、回路内を流れる電流の変化を計測した。

4.3.2 実験結果

入力した信号の周波数，モータの回転速度，及び回路内電流の結果を表すグラフを Fig.12 に示す．

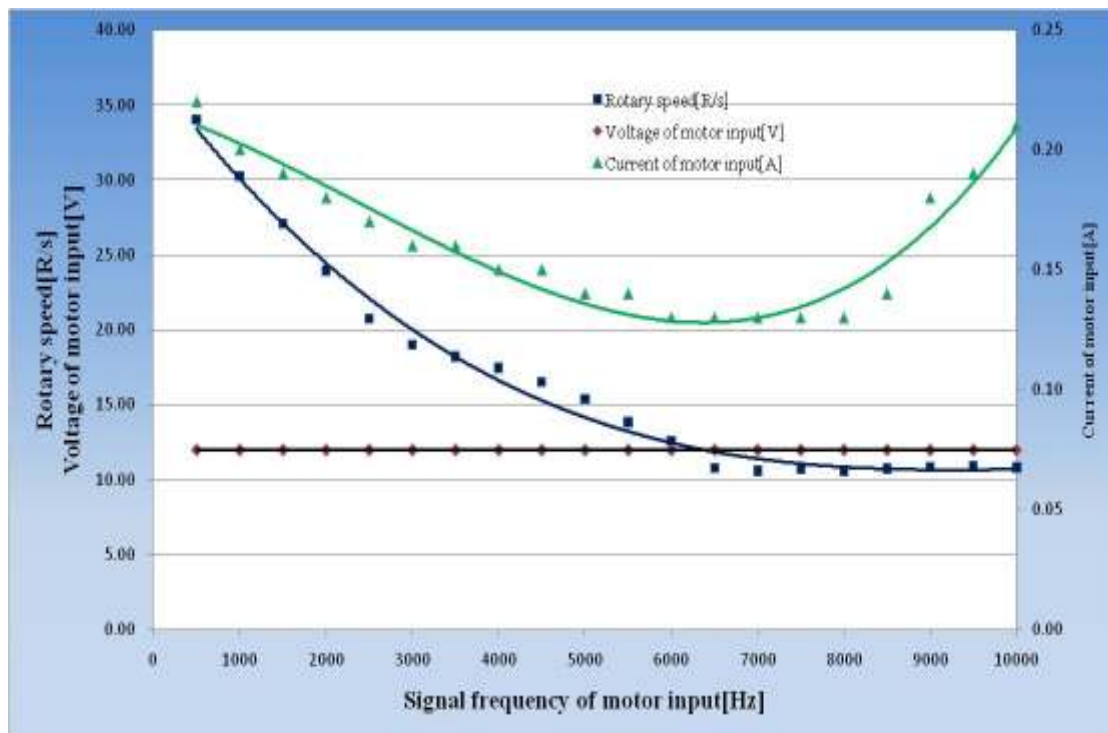


Fig.12 Rotary speed and the current result of the motor by the input signal frequency

Fig.12 から，入力する信号の周波数を上げることで，モータの回転速度が低下することが明らかとなった．それと同時に，周波数を上げるとシステム内の電流が低下し，更に周波数を上げ続けると 8000Hz 程度から再度電流が上昇する結果となった．このままのシステムでは，回転速度を変化させずに騒音のみを変化させることが不可能である．しかし，磁励音による騒音は入力する信号の周波数のみに起因して変化するため，6500Hz 以上の周波数帯域では回転速度がほぼ変化しないことを利用できると考えられる．6500Hz 以下の周波数帯域においては，入力する信号のデューティ比を変化させることで実効電圧を下げることで，加えて，入力する電圧自体を下げて調整を行うことで，一定の回転速度を保つことが可能になると考えられる．

4.4 入力信号周波数によるモータトルクの変化

4.4.1 実験概要

4.3の実験より、デューティ比を固定した場合、入力信号の周波数によってモータの回転速度が変化することが確かめられた。そこで、デューティ比を変化させることで回転速度を一定に保った場合のモータトルクの変化を確かめた。

まず、基本とする回転速度を設定し、各周波数において等速度となるデューティ比を実験から求めた。次にそのデューティ比を利用して、入力信号周波数がトルクに与える影響を調べた。

4.4.2 モータトルクの計測方法

まずトルク計測の手法であるが、モータの先端にプーリーを接続し、プーリーに紐を取り付ける。その紐の先端をバネ秤に接続してトルクを求める。実験に用いたトルク計測の手法については以下に示す。

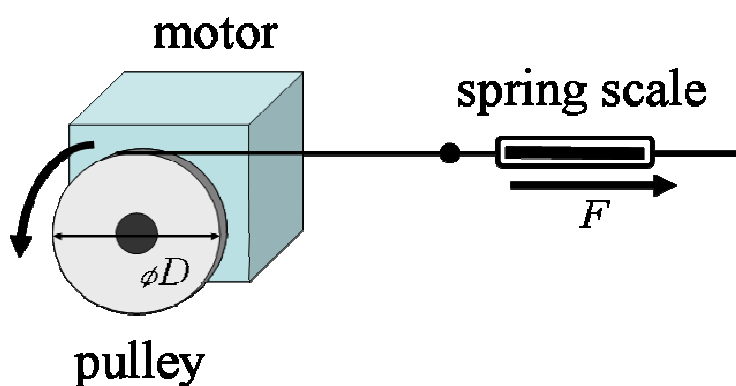


Fig.13 Measurement overview

この場合のモータトルクは以下のようにして求めた。

$$T_L = \frac{FD}{2} [N \cdot m] \quad (6)$$

T_L = モータトルク [N・m]

D = プーリー径 [m]

F = 主軸が回転を始める時の力 [N]

(F = バネ秤の値 [kg] × g [m/s²])

4.4.3 実験装置

実験用のモータには、先ほどの実験と同一のモータを用いる。本研究の実験に用いているモータドライバは、16000Hz を超えると動作できなくなり、モータの回転が停止することをまず確かめた。そこで、今回の実験の入力周波数の範囲は、500~16000Hz に設定した。また、基準とする回転数については、デューティ比 50%の状態において、実験に用いる最高周波数である 16000Hz 信号入力時の回転速度を設定した。信号の形状は矩形波、実験時の回路電圧・電流はそれぞれ 1.32A, 12.01V であった。

Table 4 Signal specifications for experiments

Frequency band[Hz]	500 ~ 16000
Voltage[V]	12.01
Current[A]	1.32
Type	Square

回転速度の計測には、ファンクションジェネレータのパルスカウント機能を利用して計測を行った。また、計測数値の表示には、PSoC マイコンの UART モジュールを利用し、PC にデータを通信して表示を行った。



Fig.14 Motor with a pulley



Fig.15 Electronic spring scale

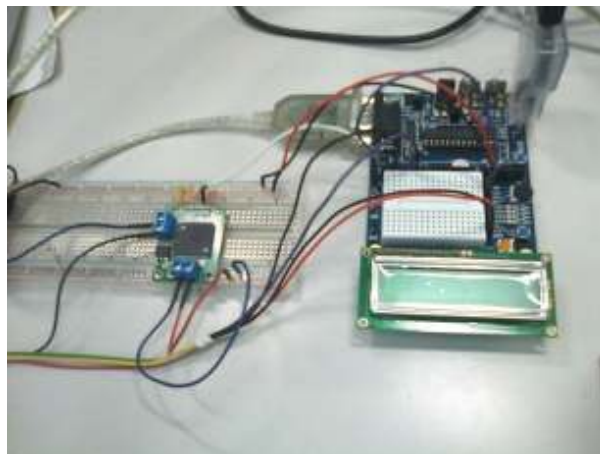


Fig.16 Experiment system

4.4.4 実験結果

入力した信号の周波数，各周波数ごとの入力信号のデューティ比，計測されたモータトルクの結果を表すグラフを Fig.17 に示す．

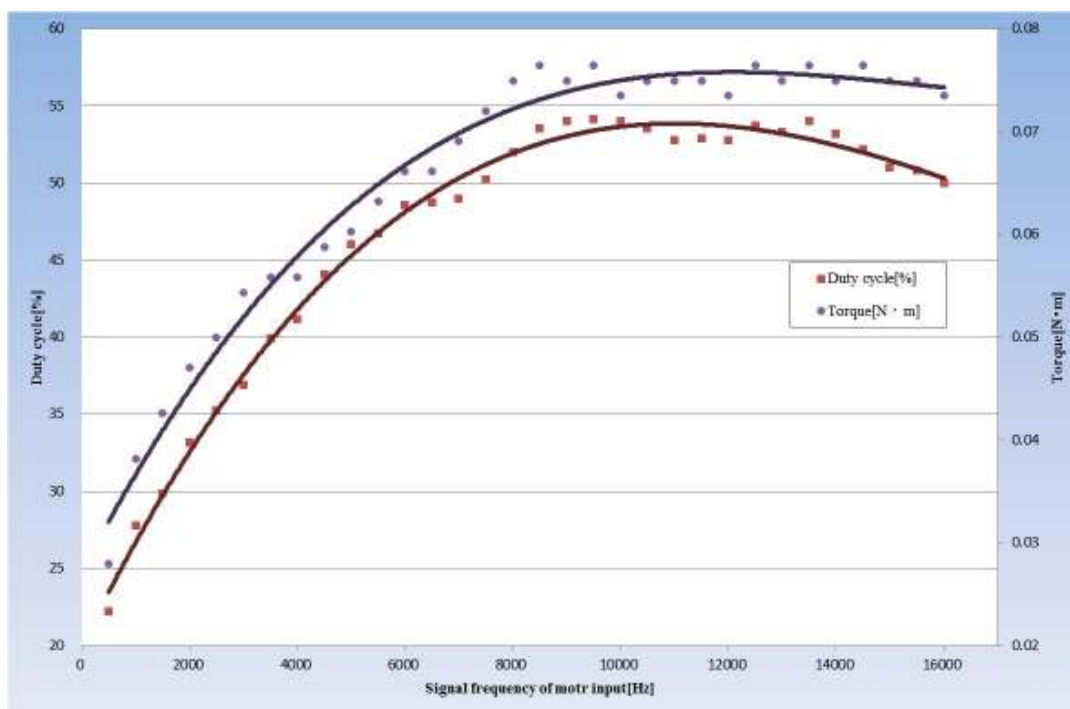


Fig.17 Duty cycle of motor input and motor torque

Fig.17 より，モータから得られるトルクは，デューティ比に最も強く影響を受けていることが分かる．入力する信号の周波数によって回転速度は大きく変わるため，今回の実験では図のように大きくデューティ比が変化することとなった．トルクだけに関して言えば，デューティ比に沿って変化し，周波数の変化だけに伴うトルクの変化は発生しないことが確認できた．

4.5 回転速度を一定にするためのデューティ比の制御

4.5.1 実験概要

これまでの実験より，本システムの有用性・有効性が示された．4.4の実験より求められた入力信号周波数に対するデューティ比の変化を PSoC マイコン上のプログラムに実装し，一定の回転速度を得ることが可能であるかを確認した．4.4の実験より近似式を求め，プログラムへのデューティ比の変化率の実装を行った．近似式については後述する．実験装置，計測装置については，4.4の実験と同様の条件を用いている．

4.5.2 最小二乗法

近似式を複数のデータより求める方法として，広く知られ用いられるものに最小二乗法という手法がある．これは，測定で得られたデータに対して，1次関数，対数曲線など特定の関数を用いて近似するときに，求める関数が測定値に対してより高い近似度を得るために，残差の二乗和を最小とするような係数を決定する方法である．具体的には，残差二乗和を各係数で偏微分した式に対して，0に等しいとした連立方程式を立てて解く．すなわち，求める関数を $y = ax^2 + bx + c$ とした場合，残差二乗和 S を

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \quad (7)$$

として，

$$\begin{aligned} \frac{dS}{da} &= 0 \\ \frac{dS}{db} &= 0 \\ \frac{dS}{dc} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

これらから連立方程式を得，それを解く．

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n -2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)x_i^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n -2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c)x_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n -2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n ax_i^4 + \sum_{i=1}^n bx_i^3 + \sum_{i=1}^n cx_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n ax_i^3 + \sum_{i=1}^n bx_i^2 + \sum_{i=1}^n cx_i &= \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n ax_i^2 + \sum_{i=1}^n bx_i + \sum_{i=1}^n c &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\Rightarrow X^T X \alpha = X^T y \quad (12)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (13)$$

4.5.3 実験結果

入力した信号の周波数と計測された回転速度の結果を Fig.18 に示す.

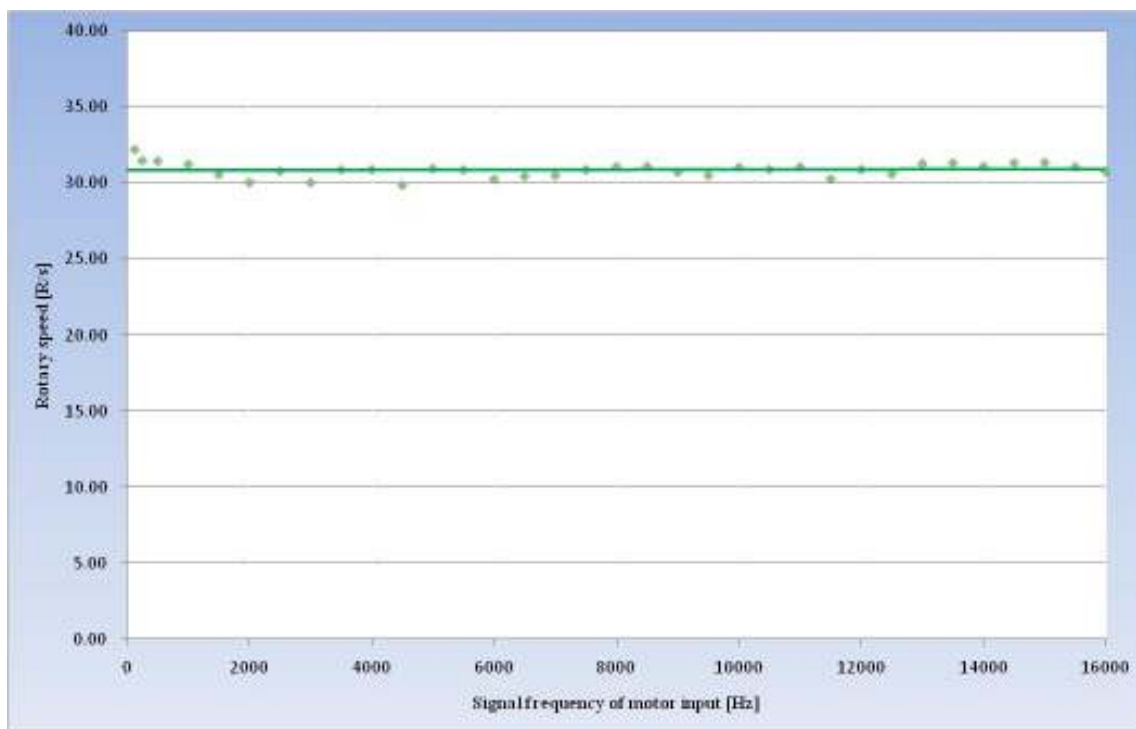


Fig.18 The rotary speed result of the motor by the input signal frequency

Fig.18 より, 低周波数域に関しては比較的誤差が大きいが, 500Hz 程度以上の範囲においてはおおむね一定の回転速度が得られたことがわかる. この実験から, モータから任意の周波数の騒音を発生させると同時にデューティ比を制御することで, 回転速度を一定に保つことが可能であると確かめられた.

第5章 おわりに

入力信号の周波数と発生する騒音の周波数が一致し、モータ騒音を目的の周波数に変化させることが可能であると確かめられた。入力信号の周波数の変化により、モータ性能に変化が発生するが、実行電圧制御により解決できることが確かめられた。

音響デバイスとしてモータ制御を行うためのシステムを提案した。

参考文献

- [1] S. Fujiwara, D. Sakai, A. Iwahara and T. Toi, "Sound design of vacuum cleaner based on sound quality evaluation," in Proc. of the 13th National Conference of the Japan Society of Mechanical Engineers, pp. 71–72, 2003.
- [2] S. Harada and S. Yoshinaga, "Noise reduction of DC-motor using current control method," Journal of Takamatsu National College of Technology, Vol. 43, pp. 7-12, 2008.
- [3] Y. Hori and M. Takahashi, "Electromagnetic forces which affect the rotating machine and vibration and noise," Journal of the Japan Society of AEM, Vol. 7, pp. 3-11, 1999.
- [4] T. Toi and E. Kato, "Noise prediction and sound quality improvement of high speed rotating components by using acoustic excitation force," in Proc. of the 56th Conference of the Acoustical Society of Japan, Vol. 6, pp. 437–444, 2000.
- [5] T. Toi and E. Kato, "Prediction and reduction of rotation noise from high speed rotating components," in Proc. of the 56th Conference of the Acoustical Society of Japan, Vol. 10, pp. 705-712, 2003.

謝辞

本研究を進めていくにあたり、多大なるご指導を賜りました小林一行教授、渡辺嘉二郎教授に心よりの感謝を致します。

自身の研究の合間を縫って実験・執筆にご助力を頂きました小林研究室の大学院生の方々、特に大久保友幸さん、岡本直也さん、金子智成さん、中山博義さん、福田芳久さん、古野翔さん、堀川照生さんに深く感謝し、この場を借りてお礼を申し上げます。

最後となりますが、この機会を与えて下さった両親と友人に深く感謝致します。

付録

本研究において数値の解析・表示に用いたプログラムを以下に示す

4.1

```
data1=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥500.wav');
data2=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥1000.wav');
data3=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥1500.wav');
data4=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥2000.wav');
data5=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥2500.wav');
data6=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥3000.wav');
data7=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥3500.wav');
data8=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥4000.wav');
data9=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥4500.wav');
data10=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥5000.wav');
data11=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥5500.wav');
data12=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥6000.wav');
data13=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥6500.wav');
data14=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥7000.wav');
data15=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥7500.wav');
data16=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥8000.wav');
data17=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥8500.wav');
data18=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥9000.wav');
data19=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My Documents\Pulsecount¥9500.wav');
data20=wavread('C:\Documents and Settings\takaaki\My
Documents\Pulsecount¥10000.wav');
dt=0.01;t=0:dt:441;f=t/dt;
fdata1=fft(data1(1:44100));fdata2=fft(data2(1:44100));fdata3=fft(data3(1:44100));
fdata4=fft(data4(1:44100));fdata5=fft(data5(1:44100));fdata6=fft(data6(1:44100));
fdata7=fft(data7(1:44100));fdata8=fft(data8(1:44100));
fdata9=fft(data9(1:44100));fdata10=fft(data10(1:44100));
fdata11=fft(data11(1:44100));fdata12=fft(data12(1:44100));
fdata13=fft(data13(1:44100));fdata14=fft(data14(1:44100));
fdata15=fft(data15(1:44100));fdata16=fft(data16(1:44100));
```

```

fdata17=fft(data17(1:44100));fdata18=fft(data18(1:44100));
fdata19=fft(data19(1:44100));fdata20=fft(data20(1:44100));
fdata=[fdata1;fdata2;fdata3;fdata4;fdata5;fdata6;fdata7;fdata8;fdata9;fdata10;fdata11
;fdata12;fdata13;fdata14;fdata15;fdata16;fdata17;fdata18;fdata19;fdata20];
surf(f(100:8000),500:500:10000,log10(abs(fdata(:,100:8000))/length(fdata1)*2)*20);
shading interp
xlabel('Output frequency [Hz]');ylabel('Input frequency [Hz]');zlabel('Output intensity
[dB]');

```

4.2 , 4.3

```

long pulse=0;
double setdata,double ddata;
int idata,jdata,pdata;
long mil=1000000;
int fdata=500;
int time=0;
int ppdata,pudata;
void main(void) {
    SW_PORT=SW_A | SW_B;
    Timer16_1_EnableInt();Timer16_1_Start();
    PWM16_1_Start();LCD_1_Start();PGA_1_Start(PGA_1_MEDPOWER);
    MSC_EnableGInt;
    ADCINCVR_1_Start(ADCINCVR_1_HIGHPOWER);
    ADCINCVR_1_SetResolution(10);
    ADCINCVR_1_GetSamples(0);
    pdata=mil/fdata;
    ppdata=pdata-1; PWM16_1_WritePeriod(ppdata);
    pudata=pdata/2-1;
    PWM16_1_WritePulseWidth(pudata);
    for(;;) {
        while(ADCINCVR_1_fIsDataAvailable() == 0);
        idata = ADCINCVR_1_iGetData();
        ADCINCVR_1_ClearFlag();
        if(jdata!=idata) {
            setdata=(double) idata/(double) 1023*(double) ppdata;
            PWM16_1_WritePulseWidth((int) setdata);

```



```

        ddata=(double)setdata/(double)pdata*(double)100;
        jdata=idata;}}
while(1){
    while(SW_PORT & SW_A){}
        if(SW_PORT & SW_B){pulse++;}
        else{pulse--;}
    while(!(SW_PORT & SW_A)){}}}
#pragma interrupt_handler Timer16_1_ISR
unsigned int count=50000;
void Timer16_1_ISR(void){
char    timer[8], shdata[16], vdata[16], pulsedata[16], cdata[16], dudata[16];
    count++;
    if(count>=20000){
        LCD_1_Position(0,0);itoa(timer,time,10);LCD_1_PrString(timer);LCD_1_PrCS
tring("    ");
        LCD_1_Position(0,4);itoa(shdata,(int)setdata,10);LCD_1_PrString(shdata);
LCD_1_PrCString("    ");
        LCD_1_Position(0,11);itoa(vdata,idata,10);LCD_1_PrString(vdata);LCD_1_Pr
CString("    ");
        LCD_1_Position(1,0);itoa(pulsedata,pulse,10);LCD_1_PrString(pulsedata);
LCD_1_PrCString("    ");
        LCD_1_Position(1,6);itoa(cdata,fdata,10);LCD_1_PrString(cdata);LCD_1_PrC
String("    ");
        LCD_1_Position(1,12);itoa(dudata,(int)ddata,10);LCD_1_PrString(dudata);
LCD_1_PrCString("    ");
        Time++; count=0;pulse=0;
    }}

```

4.4

```

int idata, jdata;
long mil=1000000;
int fdata=16000;
int pdata, ppdata, pudata;
double setdata, ddata;
unsigned long lcount=0;
int time=1;

```

```

char    shdata[16], vdata[16], cdata[16], dudata[16];
int  rtable[16]={0, -1, +1, 0, +1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, +1, 0, +1, -1, 0};
void  main(void) {
    int  SWA, SWB, pSWA, pSWB;
    PRTODR = SW_A | SW_B;
    PGA_1_Start(PGA_1_MEDPOWER);
    ADCINCVR_1_Start(ADCINCVR_1_HIGHPOWER);
    ADCINCVR_1_SetResolution(10);
    ADCINCVR_1_GetSamples(0);
    pdata = mil/fdata;
    ppdata = pdata - 1;PWM16_1_WritePeriod(ppdata);
    pudata=pdata / 2 - 1;PWM16_1_WritePulseWidth(pudata);
    PWM16_2_WritePeriod(625-1);PWM16_2_WritePulseWidth(312);
    PWM16_2_Start();
    UART_1_CmdReset();
    UART_1_IntCnt1(UART_1_ENABLE_RX_INT);
    UART_1_Start(UART_1_PARITY_NONE);
    M8C_EnableGInt;
    UART_1_CPutString("Freq VResi PWidth D");
    UART_1_CPutString("YrYn");
    Counter32_1_WritePeriod(2147483646);
    Counter32_1_WriteCompareValue(2147483645);
    Counter32_1_Start();
    for(;;) {
        if(ADCINCVR_1_fIsDataAvailable() != 0) {
            idata = ADCINCVR_1_iGetData();
            ADCINCVR_1_ClearFlag();
            if(jdata != idata){
                setdata = (double)idata *(double)ppdata / (double)1023;
                PWM16_1_WritePulseWidth((int)setdata);
                ddata = (double)setdata * (double)1000 / (double)pdata;
                jdata = idata;
            }
            CurrentPORT=PRTODR;
            SWA = 0;if(CurrentPORT & 0x02) SWA = 1;           SWB =
0;if(CurrentPORT & 0x04) SWB = 1;

```

```

        pulse += rtable[(pSWA <<3) | (SWA << 2) | (pSWB << 1) | (pSWB)];
        pSWA = SWA;pSWB = SWB;
        if(lcount <= (long)2099483645) {
            Counter32_1_Stop();
            itoa(shdata, (int) setdata, 10); itoa(vdata, idata, 10); itoa(cdata, fdata, 10); i
toa(dudata, (int) ddata, 10);
            UART_1_CPutString("Freq "); UART_1_PutString(cdata);
            UART_1_CPutString(" VR "); UART_1_PutString(vdata);
            UART_1_CPutString(" PWidth "); UART_1_PutString(shdata);
            UART_1_CPutString(" D "); UART_1_PutString(dudata);
            UART_1_CPutString("YrYn");
            time++;
            Counter32_1_WritePeriod(2147483646); Counter32_1_Start();
        }
    }
}

```

4.5

```

int idata, jdata;
long mil=1000000;
int fdata=16000;
int pdata, ppdata, pudata;
double setdata, ddata;
unsigned int count=0;
double aaa=0;
void main(void) {
    PWM16_1_Start();
    PGA_1_Start(PGA_1_MEDPOWER);
    ADCINCVR_1_Start(ADCINCVR_1_HIGHPOWER);
    ADCINCVR_1_SetResolution(10);
    ADCINCVR_1_GetSamples(0);
    pdata = mil/fdata;
    ppdata = pdata - 1; PWM16_1_WritePeriod(ppdata);
    pudata=pdata / 2 - 1; PWM16_1_WritePulseWidth(pudata);
    PWM16_2_WritePeriod(625-1); PWM16_2_WritePulseWidth(312);
    PWM16_2_Start();
    UART_1_CmdReset();
    UART_1_IntCntl(UART_1_ENABLE_RX_INT);
}

```

```

UART_1_Start(UART_1_PARITY_NONE);
MSC_EnableGInt;
UART_1_CPutString("Freq VResi PWidth D");
UART_1_CPutString("YrYn");
for(;;) {
    if(ADCINCVR_1_fIsDataAvailable() != 0) {
        idata = ADCINCVR_1_iGetData();
        ADCINCVR_1_ClearFlag();
        if(jdata != idata) {
            fdata = (double)16000 * ((double)idata / (double)1023);
            pdata = mil / fdata;
            ppdata = pdata - 1;
            PWM16_1_WritePeriod(ppdata);
            aaa = fdata / 1000;
            ddata = -0.255757 * pow(aaa, 2) + 5.766842763 * aaa + 22.08810483871;
            setdata = ddata * pdata / 100;
            PWM16_1_WritePulseWidth((int)setdata);
            jdata = idata;
        }
    }
}
}
}
}

```