

センサレス駆動ブラシレスモータの始動方法の検討

Study on starting method of brushless-motor with sensor-less drive system

山口 創太* 恩田 一**
Sota YAMAGUCHI Hajime ONDA

Abstract: Study of starting method for brushless-motor driven with sensor-less system is described. We established a sensor-less drive system. However, an emf detection method is applied in our sensor-less drive system, which needs a starting circuit. At this study, a starting circuit was fabricated and tested. In addition, the circuit was experimented to regulate circuit constants. A starting circuit was worked well and the circuit constants affect stability of starting of the motor. **Key word;** brushless-motor, sensor-less drive, starting circuit,

1. はじめに

これまでの研究では、誘起電圧検出方式を用いてブラシレスモータのセンサレス駆動に成功した¹⁾。しかし、ブラシレスモータを自動で始動させることができず、始動方法の検討が課題となっていた。

本報告は、ブラシレスモータをセンサレスで始動するための方法および具体的な回路構成について検討を行ったものである。

2. 始動原理

2.1 始動回路の必要性

本研究ではセンサレス駆動時の磁極位置検出方法として誘起電圧検出方式を採用している。これは、回転しているモータが発電機としても働くことを利用した方法であり、電機子巻線（ステータコイル）に発生する誘起電圧をモータ巻線の中性点と比べることによって磁極位置に応じた駆動信号を得ることができる。誘起電圧検出方式を用いることによって1サイクル中での検出ポイントが少なく済み、誘起電圧の波形から比較的容易に磁極位置を推定できる利点がある。

しかし、モータの停止時には誘起電圧が発生しないため、この方法では磁極位置検出ができない。したがって、最初にモータを十分な速度になるまで回転させる必要がある。この方法について一般的には、外部から磁極位置とは無関係な三相の信号を与え、強制的にモータを回転させる方法が用いられる²⁾。

2.2 始動信号波形

センサ付きのブラシレスモータを停止状態から徐々に回転数を上げていったとき、各相のホールセンサからは図1のような周波数が時間の経過と共に上昇する三相電圧が出力される。このような波形の電圧をホールセンサではなく、外部回路で作成し、始動信号として同じように入力

すればセンサのないブラシレスモータでも始動することができる。

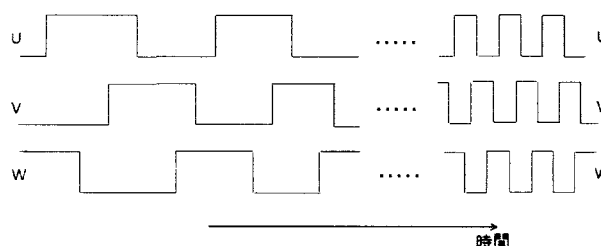


図1 回転数上昇時のホールセンサ信号

2.3 信号周波数の増加方法

信号周波数の増加方法を図2に示す。

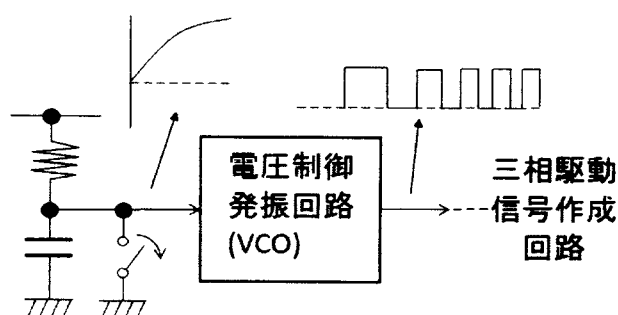


図2 信号周波数の増加方法

まず、RC回路にステップ状の電圧を加え、時間に比例して増加する電圧を作る。図中において、コンデンサとは並列にスイッチが接続されているが、これを閉じた状態から開くことによってステップ状の電圧を加えることができる。また、始動回路を構成する回路の制御タイミングはこのRC回路の出力電圧によって得るため、以下このRC回路をタイマRCと呼ぶことにする。次に、RCタイマの

2011年3月3日受理

* 理工学部 電気電子情報工学科 学生

** 理工学部 電気電子工学科

出力電圧をVCOへ加える。VCOとは後に述べるように、周波数を電圧によって変化させることができる発振回路のことである。こうして、VCO出力信号の周波数は時間の経過と共に上昇する。これを、三相駆動信号作成回路で三相分配することにより、図1のような始動信号を作ることができる。

2.4 始動回路の構成

以上より、始動回路には、RCタイマ、VCO、三相駆動信号作成回路が必要であることがわかった。さらに、定常運転へ移行するには、誘起電圧が増加し、磁極検出ができるようになったところで信号の切り替えを行う必要がある。従って、始動回路は図3のようにRCタイマ、VCO、三相駆動信号作成回路、切り替え回路で構成される。

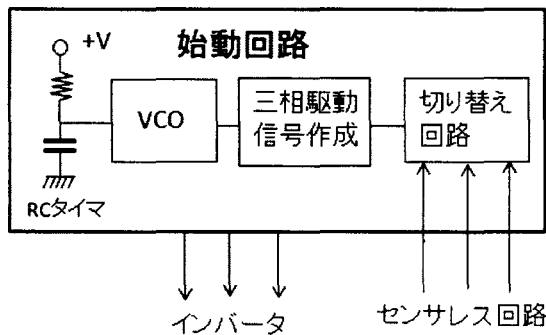


図3 始動回路の構成

3. 実験システムの構成

本研究ではまず、始動回路の動作確認を行い、続いて回路定数（始動時間、インバータのデューティ比）を変化させ、始動動作にどう影響するか実験した。使用したモータは津川製作所製のブラシレスモータで、講習会等で組み立て制作できるタイプのものであり、巻線を自分で巻いて自作したものである。

3.1 実験システムブロック図

システム全体のブロック図を図4に示す。破線で囲まれた部分が始動回路である。ここにブラシレスモータの駆動回路とセンサレス回路が接続されている。さらに、駆動回路でインバータを制御し、ブラシレスモータを駆動する。

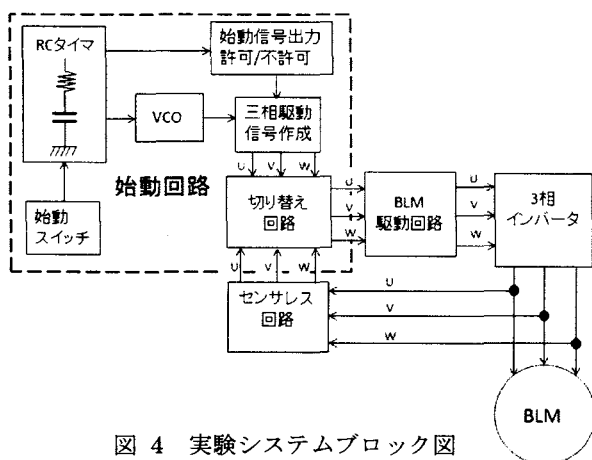


図4 実験システムブロック図

始動スイッチを投入するとRCタイマの時定数（以下タイマ時定数）で決まる時間、モータの始動を行う。しかし実際には、VCOに使われるオペアンプの基準電圧（電源電圧の1/2、本研究ではグランドから+6V）に達しなければスイッチを投入してもVCOが動作しないため、その間に異常な電圧が出力されないよう、始動信号の許可/不許可の制御回路を付け足した。以下、始動回路内の主なブロックについて説明する。

3.2 VCO

VCOとはVoltage Controlled Oscillatorの略であり、直訳すると電圧制御発振回路、すなわち、入力電圧（直流）によって周波数を制御できる発振回路である。図5に示す回路は低周波電圧制御発振回路（LF-VCO）と呼ばれ、1Hz以下の低周波信号も出力できるVCOである³⁾。本研究ではこの回路を採用した。1段目のオペアンプは極性切り替え回路であり、FETがオンすると利得1の反転増幅器として動作し、出力電圧 V_{o1} は $-V_{in}$ となる。また、FETがオフするとフォロウとして動作し、 $V_{o1}=V_{in}$ となる。2段目はミラー積分回路で、極性切り替え回路の出力を V_o/C_0R_0 の傾斜で積分する。3段目はコンパレータであり、2段目の出力 V_{o2} を基準電圧 V_{ref} と比較し、方形波を生成すると共に、 V_{o1} の極性を切り替える。なお、 V_{ref} は V_{o3} を2つの抵抗で分圧した値である。

最初、3段目のコンパレータの出力 V_{o3} がHレベルであると仮定する。このときFETがオンし、 $V_{o1}=-V_{in}$ となるため、 V_{o2} が V_o/C_0R_0 の傾きで増加する。 $V_{o2}>V_{ref}$ になると、コンパレータの出力がローレベルとなり、FETがオフする。すると V_{o1} の極性が変わり $V_{o1}=V_{in}$ となるため V_{o2} は $-V_o/C_0R_0$ の傾斜で減少する。 V_{o2} が基準電圧より低くなると V_{o3} がHレベルとなり、最初の状態に戻る。発振周波数は C_0 の充電に要する時間で決まる。 V_{in} が低いと積分回路入力電流は小さくなり、充電に要する時間が長くなるため、発振周波数は低くなる。逆に V_{in} が高いと入力電流は大きくなり、充電に要する時間が短くなるため、発振周波数は高くなる。この特性を利用して、発振周波数を制御することができる。

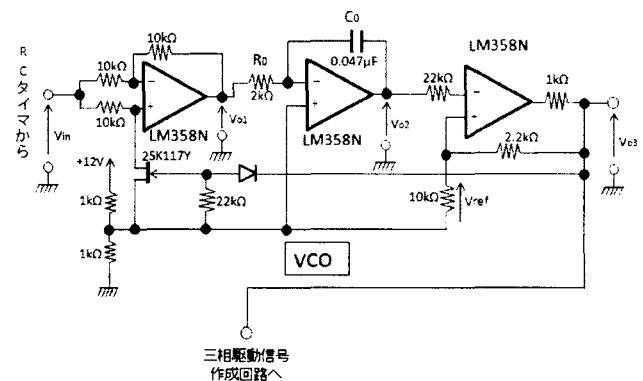


図5 電圧制御発振回路 (VCO)

3.3 三相駆動信号作成回路

三相駆動信号作成回路の構成を図6に示す。三相の信号波形を作成するには、3相分の立ち上がり、立下りのタイ

ミングを制御する必要があり、従って、信号波形1サイクルにつき6回の制御が必要となる。VCOからの信号はまず、カウンタIC(TC4520BP)へ入力され、2進数の000から101まで6ステップで計数する。カウンタICの出力をBCD-10進デコーダへ入力すると、カウント値に応じた制御タイミングを生成する。これをRS-FFへ入力すると3相の始動信号を作ることができる。信号の出力を持続させるためには、カウント値が101になったところでカウンタをクリアし、再度計数する必要があるが、クリア動作が安定になるように単安定マルチバイブレータIC(TC4538BP)を使用した。これにカウンタICの Q_0 、 Q_2 をAND演算し、入力すると、カウンタICが101を出力し終わったタイミングでクリア動作ができる。

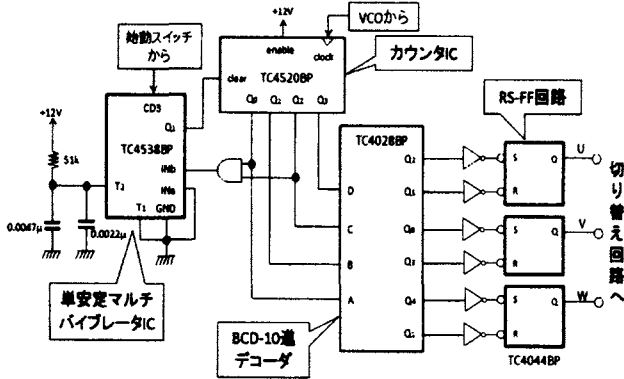


図6 三相駆動信号作成回路

3.4 切り替え回路

切り替え回路の構成を図7に示す。始動スイッチ投入直後は左側のコンパレータCMP1の出力がHであり、右側のコンパレータCMP2の出力がLとなっている。従って、左側のAND回路へHが入力され、三相駆動信号作成回路から

の始動信号が有効になる。その後、RCタイマの電圧がCMP1の基準電圧 V_{ref1} を超えると、CMP1出力がLとなるため、始動信号が無効になる。そしてCMP2の出力が、間のRC回路により少し遅れてHとなり、センサレス信号が有効となる。このときの遅延によって、電機子電流を一瞬遮断し、惰性で回転させてから切り替えることで円滑な切り替えができるよう工夫した。

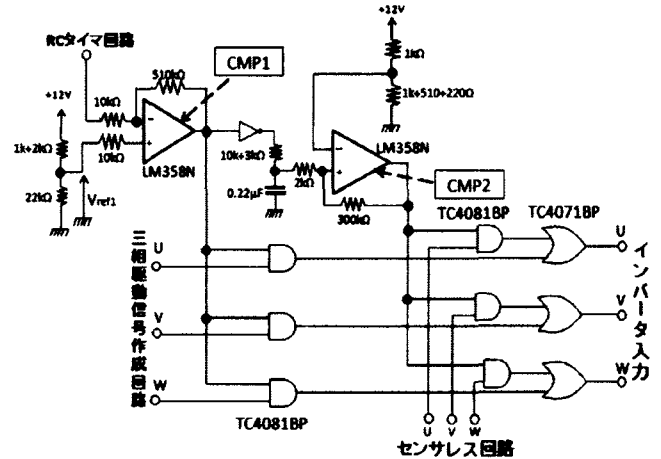


図7 切り替え回路

4.5 実験装置の構成

始動回路全体の構成図を図8に示す。これらの回路を全て1枚の基板の中に構成した。また、実験システム全体写真を図9に示す。波形の観察には図中に示す記録装置(HIOKI 8855メモリハイコーダ:日置電機)を使用した。これを使用することで10秒ほどの比較的長時間にわたって波形を取り込むことができる。

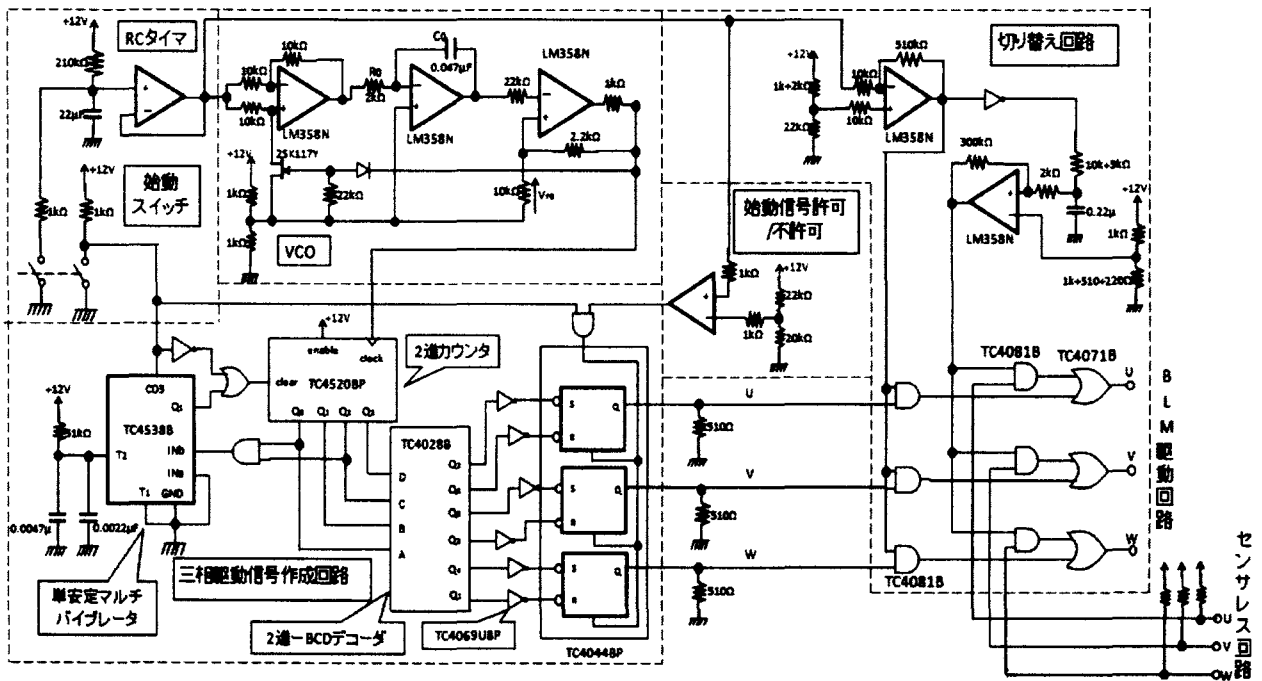


図8 BLM 始動回路

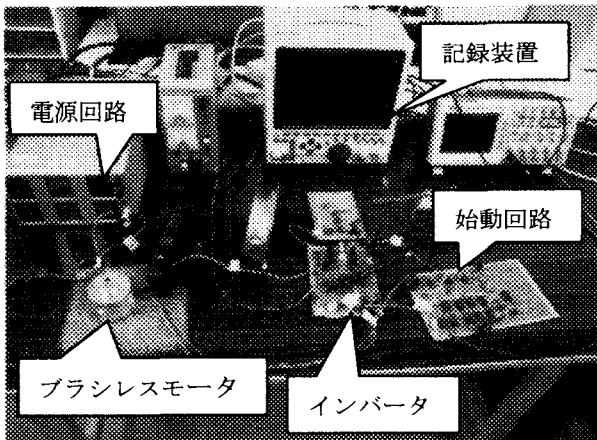


図9 実験システム全体写真

5. 実験結果

5.1 動作確認

動作確認では無負荷のブラシレスモータを実際に始動させ、動作の様子を観察し、さらに、始動信号および誘起電圧波形を観察して期待通りの動作ができるか確認した。

始動スイッチ投入後、しばらくしてモータが回転を始め、次第に回転数が上昇していく様子が見られた。数秒後、定常運転へ移行し、モータを正常に始動することができた。

回転開始直後の始動信号および誘起電圧波形を図10に示す。ただし、記録装置のチャンネル数が少なかったため、それぞれ1相分の波形について示す。

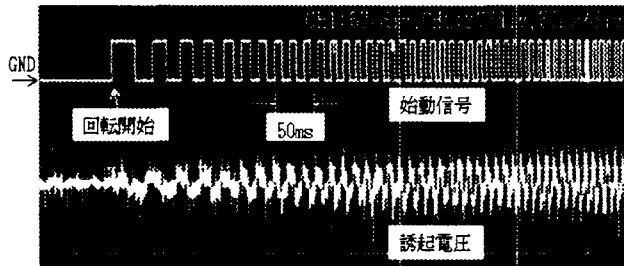


図10 回転開始時の始動信号および誘起電圧波形

図10より、始動信号は時間の経過と共に周波数が上昇していることがわかる。また、これと同時に誘起電圧の振幅が大きくなっていく様子が見られる。すなわち、始動信号と同期してモータの回転数が上昇していることがわかり、このことから、試作した始動回路でセンサの無いブラシレスモータを始動できることを確認した。

5.2 回路定数を変えて実験

この実験では、タイマ時定数やインバータのデューティ比を変え、まず、始動回路が安定して動作する回路定数の範囲を調べた。続いて、始動信号、センサレス信号、電機子電流波形を測定し、安定な場合、不安定な場合でそれぞれ比較した。なお実験の際、インバータ部分の電源電圧は24Vとした。安定な回路定数の範囲を調べた結果を表1に

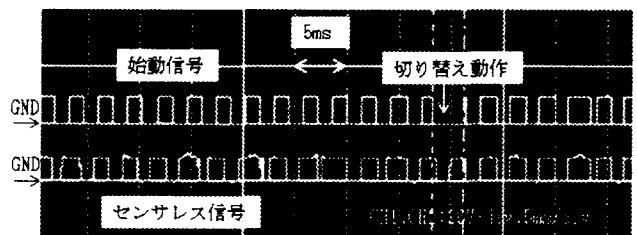
示す。

表1 安定な回路定数の範囲

	タイマ時定数[s]	デューティ比[%]
上限値	7.04	15
下限値	0.49	8
最適値	0.90	12

表1からタイマ時定数についてはかなり広い範囲で安定するのにに対し、デューティ比は数%程度の範囲でのみ安定し、わずかな変化で動作に大きな影響を与えると考えられる。また、最適値(タイマ時定数=0.90s, デューティ比=12%)で実験したとき、実際の始動時間を測定したところ、1.24~1.34sであり、タイマ時定数とほぼ等しくなることがわかった。特に、タイマ時定数を非常に小さくした際、始動中にモータが同期外れを起こし、停止してしまうことが多かった。このときの波形を測定し、安定時のものと比較すると、センサレス信号と電機子電流波形に大きな違いが見られた。

安定な場合の一例としてタイマ時定数を0.90sとした時の測定波形を図11に示す。



(a) 始動信号およびセンサレス信号 (切り替え時点拡大)



(b) 電機子電流 (動作全体)

図11 タイマ時定数=0.90sでの測定結果

図11(a)において、センサレス信号は始動信号と周波数がほぼ一致し、両者が同期できていることがわかる。さらに、図11(b)により、回転開始から切り替え動作までの間、大きな電流が流れていることがわかる。これは、停止中のモータには誘起電圧が発生しないため、電源電圧がじかに電機子巻線に印加されることに加え、巻線の抵抗が非常に小さいためである。

タイマ時定数が極端に小さい場合の例として、0.11sにした場合の測定結果を図12に示す。

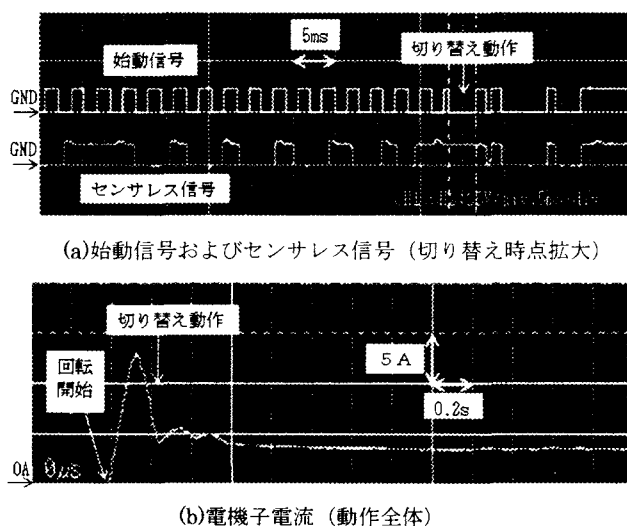


図 12 タイマ時定数=0.11s での測定結果

図 12(a)より、センサレス信号および始動信号の周期が一致していないことがわかる。始動時間を短くすると、始動信号の周波数上昇は速くなるが、あまりに早くしすぎるとロータがそれに追従できなくなり、同期外れを起こしてしまうと考えられる。また、図 12(b)を見ると、図 11(b)と同様、始動時の電流が大きくなっているが、回転開始直後の電流の立ち上がりが急峻になっている。

今回は無負荷のブラシレスモータを使用したがる、ロータ自体にも慣性モーメントがあるため、短時間で回転数を上げようとするとき大きなトルクが必要となる。すると、このときモータに流れる電流も非常に大きくなってしまふため、電源へのショックが大きくなってしまふことが考えられ、さらに、急激なトルク増加によって、モータや負荷へかかる機械的なショックも大きくなってしまふと考えられる¹⁾。

6. まとめ

①試作した始動回路により、始動信号を作成することができ、この信号によってブラシレスモータを始動することができた。従って、試作した始動回路が正常に動作することを確認した。

②ブラシレスモータの始動を安定させるためには、始動時間やインバータのデューティ比を限られた範囲で設定する必要があり、また、始動時間については安定範囲が広いのに対し、デューティ比については安定範囲が非常に狭く、特に細かい調整が必要であることがわかった。

さらに、始動時間を極端に短くした場合、うまく始動できない場合がある、モータ・負荷に対する機械的な負担や電源に対する電氣的な負担が大きくなってしまふ、といった問題があり、始動を速くするには限度があることが明らかになった。

7. 今後の課題

①定常運転中に始動スイッチを戻した場合、センサレス信号の入力が無効になってしまうためモータが停止するという問題がある。定常運転へ切り替えた後は始動回路の状態とは無関係にインバータ側で独立した運転ができるよう、切り替え回路を改良する必要がある。

②今回、始動を安定させるためには、デューティ比を細かく設定する必要がある。また、設定は始動前に行う必要がある。始動中にデューティ比を変化させることができない。そこで、始動中にも適切にデューティ比を変化させることができればより安定した動作ができると考えられる。従って、モータの状態に応じてデューティ比を制御するための回路が必要となる。

参考文献

- 1) 恩田一；“小型ブラシレスモータの高速・センサレス駆動システム”，静岡理工科大学紀要，18巻，(2010年)
- 2) トランジスタ技術 2000年2月号“センサレス DC モータの駆動法” CQ 出版，P221
- 3) 稲葉保著；“発振回路の完全マスター” 日本放送出版協会，P100 (1988)
- 4) 望月傳著；“イラスト・図解 機械を動かす電気の極意 自動化のしくみ” 技術評論社，(2004)
- 5) 谷腰欣司著；“ブラシレスモーターの実用技術 モーターの基礎から IC 制御回路と定速回転まで” 電波新聞社，(2005)
- 6) 谷腰欣司著；“ステッピングモーターの実用技術 モーターの基礎から駆動メカニズムまで” 電波新聞社，P93，120(2006)
- 7) 萩野弘司著；“ブラシレス DC モータの使い方” オーム社，(2003)