

小型ブラシレスモータの高速・センサレス駆動システム

Ultra-high speed and sensor-less drive system for small brushless-motor

恩田 一*

Hajime ONDA

Abstract: Ultra-high speed and sensor-less drive system for small brushless-motor is described. Motors are constant torque machines and output power increase with rotational speed. Then the high speed drive of a motor is very important in many applications. A brushless motor is experimented to rotate to limited rotational speed. In addition, a sensor-less drive system for a brushless motor is fabricated and tested. An emf detection method is applied to decide the rotational position of the field magnet. The drive system performed as well as a conventional drive system with Hall sensor. **Key word;** brushless-motor, sensor-less drive, high speed

1. はじめに

ブラシレスモータは直流モータ（ブラシ付き）の優秀な制御性能を有しながら、直流モータの弱点であるブラシ・整流子に起因する低信頼性・低保守性の欠点を除去した理想的なモータで、色々な用途に多数利用されてきている。しかし、巻線の極性切り換えのためにロータの磁極位置を検出する必要があり、半導体式のホールセンサ等をモータ内や回転軸回りに設置する必要がある。ホールセンサは半導体で、熱や振動に弱い電子部品であり、モータが高速で回転する環境に取り付けるのは信頼性上の懸念がある。また、このセンサ信号を得るためには、電源線を含めて最低5本の信号線が必要で、これが不要になれば、ドライバーからモータへの電線は太くて丈夫な3相の電力線3本のみとなり、配線の簡略化・信頼性の向上に結びつく。

本報告は、数百ワット程度の小型ブラシレスモータを小型・高速回転の加工機用主軸スピンドルとして応用すべく、2万～3万rpmの高速回転で、上記ホールセンサ等の磁極位置センサを使用しないセンサレス駆動方法を研究したものである。加工機においては加工時に切削液等のクーラントを使用したり、高温・高湿の環境下で使用されることが多くセンサレス方式が大変有効である。

2. ブラシレスモータの動作原理

図1はブラシ付き直流モータ（以下DCMと略記）の原理構造図である。外周の永久磁石が固定され、内側の電機子コイルが回転する回転電機子形である。ブラシβと整流子u, v, wを介して直流電源より電機子コイルに電圧を供給される。図のロータ位置では電機子コイルAはS極に、BとCはN極に励磁され、外側の永久磁石との相互作用で右方向に回転する。ロータの回転に伴って整流子も回転し、120度回転するとコイルA, B, Cは、元のコイル

C, A, B の位置に移動し、以下同様の動作を続けて回転を持続する。

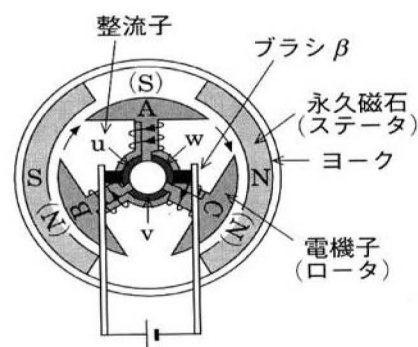


図1 ブラシ付き直流モータの原理構造

ブラシレスモータはこのDCMのブラシと整流子の機能を、ロータの位置を検出するセンサと半導体スイッチで置き換えたもので、その構成を図2に示す。なお、ブラシレスモータでは回転する部分（ロータ）は図1とは逆で、永久磁石が回転する（回転界磁形）。

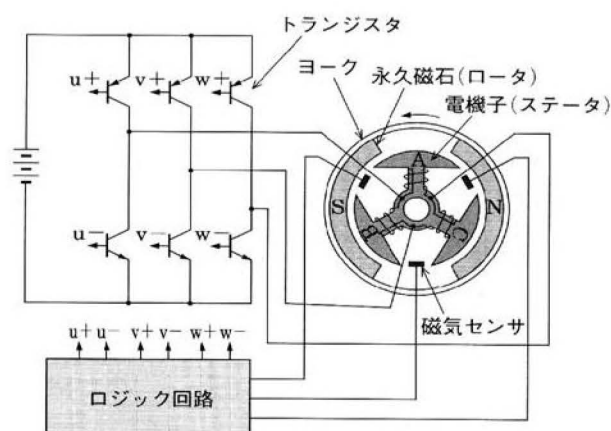


図2 ブラシレスモータ原理図

2010年3月1日受理

* 理工学部 電気電子工学科

図2において、外周の磁石の回転位置を3個の磁気センサ（通常ホールセンサを使用）で検出し、トランジスタのスイッチングにより、対応する電機子巻線へ電圧を印加する。3相巻線へ正負の電圧を供給するためには、トランジスタ回路は図2のような、いわゆる3相インバータの構成になる。磁気センサはロータ（永久磁石）の回転位置を検出するもので、例えば、u相センサは、その位置に磁石のN極が来た時にONとなり、電機子コイルのu相巻線に電圧を印加するようにトランジスタスイッチをオンする。ロジック回路は3つのセンサ信号から3相インバータ内各トランジスタのオン/オフ信号を作り出すための論理回路である。u、v、w 3相分のセンサと3相インバータにより、ブラシと整流子は無いが、特性的にはDCMと同じようなモータが実現できる。

このブラシレスモータにおいては、半導体素子からなるセンサをモータ内か外側の回転軸回りに設置する必要がある。モータ周辺は高温・高湿、振動が多いなどの悪環境であることを考えると、信頼性の点で懸念がある。また、モータへの配線はメインの3相分電力線の他に、センサ用の3本の信号線とセンサに電圧を供給する電源線（±の2本）が必要である。信号用電線は細い電線でかさばらないものの、振動や熱等のストレスに弱く、装置の信頼性を低下させる要因になっている。このような懸念から、センサをなくして部品点数を減少させ、信頼性を向上させるために、センサレス駆動方式が検討されるようになった。

3. センサレス駆動方式の原理

3.1 種々のセンサレス方式と誘起電圧検出方式

ブラシレスモータのセンサレス駆動には種々の方式が提案されており、現在でも電気学会誌等で研究されている状況である^{4), 5)}。代表的なものとして、①誘起電圧検出方式 ②直流電流検出方式 ③インダクタンス検出方式等がある¹⁾。ここでは最も取り組みやすい誘起電圧検出方式により実現する方法を研究する。

3.2 誘起電圧検出方式

モータは電機子に電圧をかけないで外部から強制的に回転させると発電機として働き、誘起電圧を発生する。モータとして動作中も回転上昇に伴って誘起電圧を発生し、誘起電圧と印加電圧の差に対応した電流が流れてトルクを発生する。この誘起電圧は回転する磁石の極性に対応した波形を有しており、誘起電圧波形が検出できれば磁極位置を検出することができる。ただし、モータの端子電圧は、この誘起電圧とコイルインピーダンスによる電圧降下の和であるためにフィルタによりノイズ分を除去して真の誘起電圧を検出する必要がある。

誘起電圧の検出には3相の線間電圧を利用する方法と相電圧を利用する方法がある。後者は3相の中性点と各相電圧の差を検出し、比較器により電圧比較して検出するので、検出原理が単純で回路的にも実現しやすいため、本研究ではこの方式を採用した。

4. 実験システムの構成

本研究では①高速回転駆動 ②センサレス駆動の2項目について実験した。それぞれについて項目別に説明する。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製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。

4.1 高速回転駆動実験システム

高速回転実験はホールセンサ付きブラシレスモータで実験した。実験回路を図3に、装置全体写真を図4に示す。

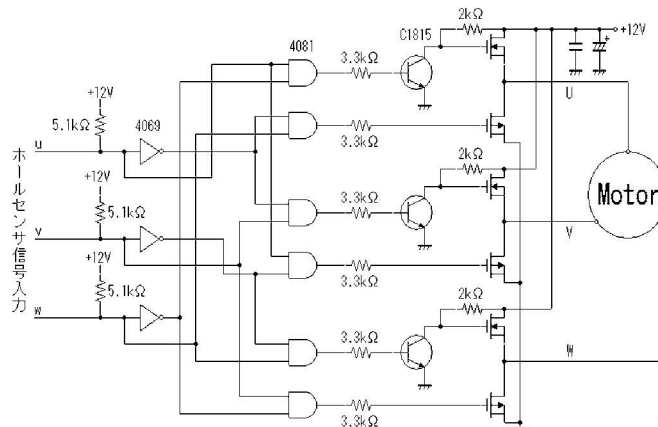


図3 高速回転駆動実験回路

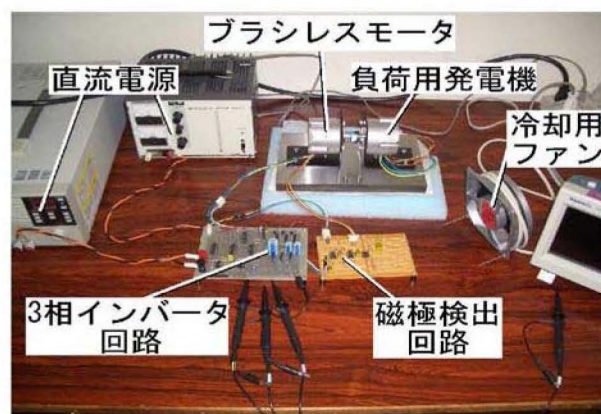


図4 実験装置写真

この回路は120度通電方式であり、図中には記載していないが通流率制御方式の電圧制御を行っている。出力段はパワーMOSFETを使用し、ハイサイド（上側）はPチャンネル、ローサイド（下側）はNチャンネルのトランジスタを使用することにより、ゲートドライブ回路の簡易化を図っている。実験装置写真で、供試モータに直結して同型のモータを負荷発電機として使用した。

4.2 センサレス駆動実験システム

センサレス駆動のための磁極位置検出には前述の中性点を基準とした誘起電圧検出方式を採用した。その回路図を図5に示す。モータの中性点は取り出せないため、モータ外部で抵抗を星形結線し、その中性点を基準電圧として使用した。この中性点電圧と各相電圧を2分の1に分圧した電圧を比較して各相の磁石位置信号（センサレス信号）

とした。中性点電圧、各相電圧は図のようにコンデンサによるハイパスフィルタでスイッチングによるノイズ成分を除去した。

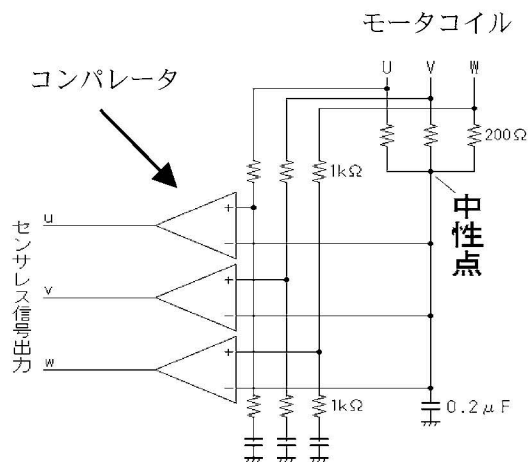


図5 磁極位置検出回路

センサレス駆動回路を図6に示す。磁極位置信号は、上記図5により検出した擬似信号（センサレス信号）を図3の回路図のホールセンサ信号として接続した。なお、実験に際してはセンサ付き実験とセンサレス実験が簡単にできるように、コネクタで信号を切り換えられるように工夫した。

通流率制御のためのPWM信号発生回路も図中に示した。PWM信号発生回路は矩形波発生回路と、これを積分する回路により、矩形波を積分して三角波をつくり、この三角波と制御信号（図中では可変抵抗による指令値）を比較してPWM信号を得ている。

ここで使用したオペアンプ（演算増幅器）は、回路の簡易化を目的として、単一電源で使用でき、出力電圧が電源電圧近くまでとれるタイプを使用した。

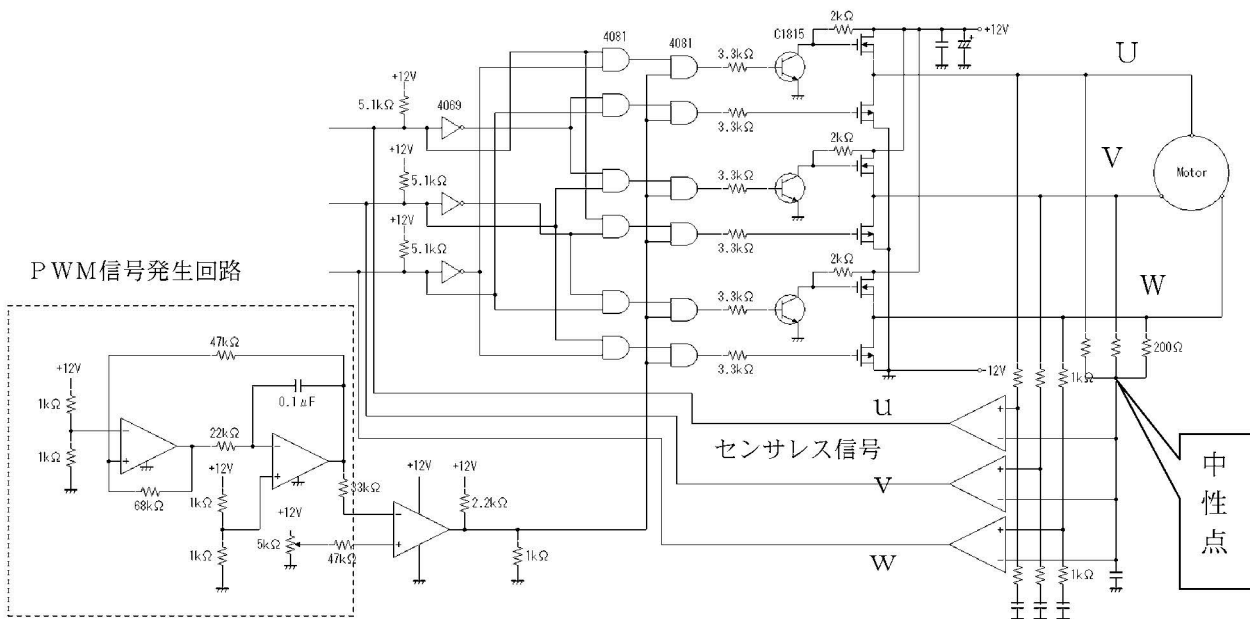


図6 センサレス駆動回路図

5. 実験結果

5.1 高速回転駆動実験結果

高速回転駆動実験結果のグラフを図7に示す。通流率制御のデューティを上げて行くと回転数が上昇し、デューティ90%で20,000 rpmを超えた。この時、モータへの入力電力は160Wであった。高速回転時は効率が悪く、モータ効率が50%程度と予測されるので、モータ出力は80W程度と思われる。

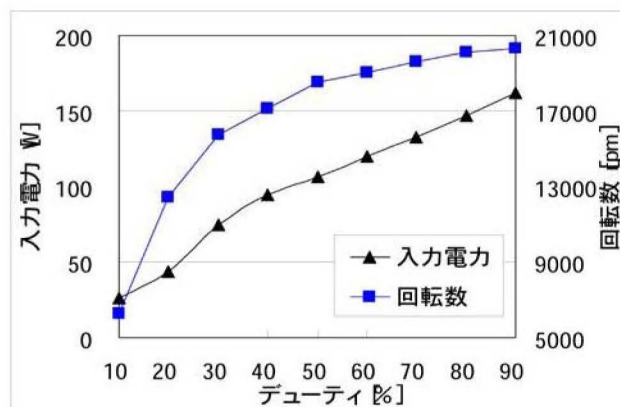


図7 高速回転特性

最大回転数で回転中にモータに異常が発生し、モータは停止した。モータを分解してみるとロータの永久磁石の接着がはがれ破損していた（図8）。メーカーに問い合わせるとモータの発熱により、接着剤の接着強度が低下し、接着がはがれて、ハウジングにあたり、破損したものという回答があった。このモータは冷却が不完全で、内部で発生した熱を外部に排出する機能を有していないために、内部温度の上昇が大きかったものと思われる。また、このときのロータに働く遠心力もかなり大きなものと思われる。

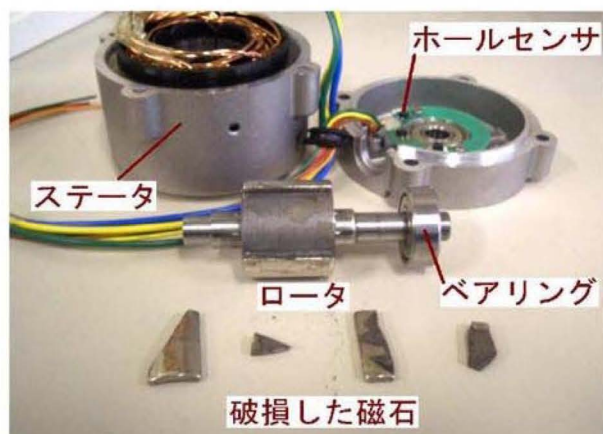


図8 高速駆動実験結果破損したモータ

5.2 センサレス駆動実験結果

ホールセンサ信号の代わりに図5の回路により検出した磁極位置信号（センサレス信号）を用いて図6の回路で回転駆動した。誘起電圧検出方式のセンサレス駆動は、始動時には誘起電圧がゼロのため、何らかの方法で始動させる必要がある。ここでは手で回転させて始動した。

当初の調整では種々の回転数においてノイズによる誤動作と思われる不規則な回転変動が観察された。インバータ回りの主回路におけるノイズ対策をした結果、この不規則な回転変動は収まった。この状態で、ホールセンサ方式とセンサレス方式の両者について、電圧と回転数の関係を調べた。結果を図9に示す。

図9から、センサレス方式はホールセンサ方式に比べて回転数が低い傾向があり、ホールセンサ方式と同じ動作ができていないことが推察される。両者の回転数差は回転数の上昇に伴って大きくなっていることから、回路素子の動作速度に関する現象と推察できる。

図5に示した磁極位置検出回路のセンサレス信号をオシロスコープで観察した結果を図10に示す。

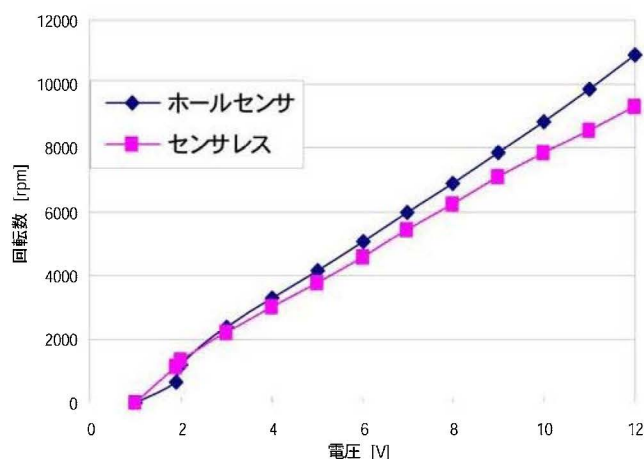


図9 センサレスとセンサ付の比較

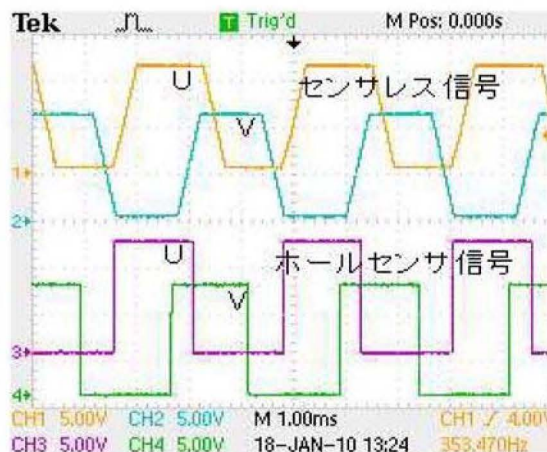


図10 センサレス信号波形（改良前）

上側2つの信号は図5の回路で得たセンサレス信号、下側の2つの信号は、同時に動作しているホールセンサからの信号である。センサレス信号はホールセンサ信号に比べて立ち上がり、立下りが遅く、適正に動作できていないことが推察される。これは図5の回路に使用したオペアンプ（MAX478）の動作（特にスリユレート V/s）が遅いために生じる現象である。そこで、スリユレートのより速いオペアンプであるLM358を選定して動作させた結果、図11に示すような波形が得られた。

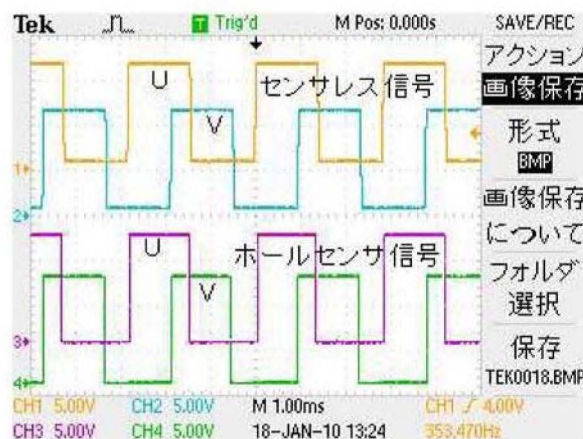


図11 センサレス信号波形（改良後）

図11では、図5の回路で取り出したセンサレス信号はホールセンサ信号とほぼ同じ波形で、正しい磁極位置信号として利用できると思われる。

このセンサレス信号を使ってセンサレス駆動した結果の電圧／回転数特性を図12に示す。センサレス駆動による結果は、ホールセンサ付きの場合と全く同様の特性を示し、誤動作等が発生していないことが判る。また、回転状態も振動が少なく、静粛に回転していることが確認された。

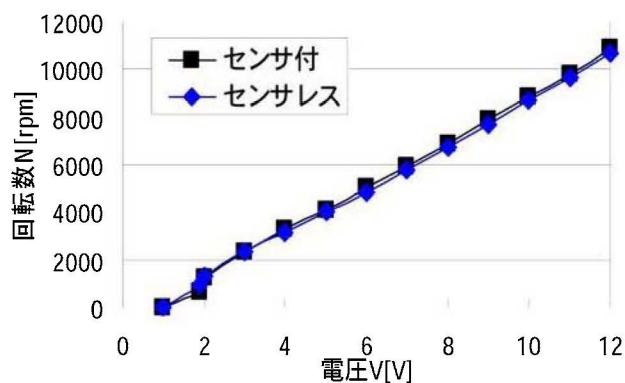


図 12 改良後の電圧と速度特性

6. まとめ

小型ブラシレスモータを 20,000~30,000 rpm で高速回転させるために①モータ自体の機械的強度確認実験と②小型化、高信頼性化を狙ったセンサレス駆動の2テーマについて検討した。

①機械的強度については、モータの内部温度上昇による磁石の接着強度低下と遠心力により、20,000 rpm 程度で磁石が剥がれて破損することが判った。

②センサレス駆動については、誘起電圧検出方式で基本的な動作の確認ができ、低速から 11,000 rpm 程度までセンサレス駆動できることを確認した。高速回転させるためには、磁極位置検出もそれなりに高速に行う必要があり、そのために、使用するオペアンプも高速仕様のものを使う必要があることが判った。

7. 今後の課題

高速回転に関しては、温度上昇による接着剤の強度低下を防ぐために、冷却機構を設ける必要がある。特に、ステータ内部の熱を除去するために外部から圧縮空気を送るなどの方法が必要である。また、工作機等の液冷装置を有している環境では、ステータハウジングにウォータージャケットを設けて液冷する方法も効果があると思われる。併せて、チタン材のような非磁性高強度材でロータをカバーして機械的に補強する等の方法も考えられる。

センサレス駆動については始動方法を備える必要がある。回転方向が一定の用途では、あらかじめ決められたシーケンスのパルス列をインバータの各トランジスタに送って、パルスモータ的に回転させる方法が最も簡便な方法と思われる。この時、回転数（パルス周波数）と印加電圧を比例させて動作させる必要があるが、低速回転でセンサレス駆動が可能であれば、それほど厳密な比例関係でなくても始動ができると思われる。

センサレス駆動では、回転数により基本周波数が変化するため、回転数の可変範囲があまり広いと図5のノイズ除去用フィルタの効果が低下する。従って、回転数可変範囲との関連で、フィルタの時定数を厳密に設定する必要がある。特に、センサレス駆動で 30,000 rpm 程度まで回転させようとする場合、フィルタの時定数設定は重要になる。

以上の課題をクリアして、センサレス駆動で 30,000 rpm の回転を実現し、小型工作機の主軸スピンドルとして応用することを目指して研究を続けたい。

本研究は 2009 年度卒業研究として実施したものである。担当した卒研生の五島洋恭君、蛭間勇介君の努力に感謝致します。

参考文献

- 1) 見城尚志、永盛重信著；“新・ブラシレスモータ”，総合電子出版，P79(2000 年)
- 2) トランジスタ技術 Special No.73；“ブラシレスモータのサーボ回路技術”CQ 出版，P38 (2001)
- 3) 荻野弘司著；“ブラシレスモータの使い方”オーム社 (1995)
- 4) 市川真士他；“拡張誘起電圧モデルに基づく凸極型永久磁石同期モータのセンサレス制御”電学誌 D, P1089, Vol.122, No.12 (2002)
- 5) 山中建二他；“センサレス制御永久磁石同期電動機の実験特性”平成 18 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集，P I-407 (2006)