

令和 2 年 9 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03216

研究課題名(和文)異種的な計測多重化によるモータドライブシステムの耐故障性向上可能性の検討

研究課題名(英文) Fail-tolerance of motor drive system by Heterogeneous Multiplexing of measurements

研究代表者

道木 慎二 (DOKI, SHINJI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10273260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、耐故障性向上において一般的な『磁気回路・電気回路・センサ等に単に予備を設ける「同種(ホモジニアス)的な多相化・多重化」』に加え、状態推定によるセンサレス制御の考え方を利用し、『「あるセンサによる測定値」を「他のセンサを組合わせて得られる推定値」と相互補完しあうことで、推定精度、故障検出、故障時の補完などを可能とする「異種(ヘテロジニアス)的な多相化」』による耐故障性向上の可能性を検討した。

問題設定として、モータドライブにおいて、位置センサ・電流センサのいずれか一方が故障する場合を想定し、その際にも運転継続可能な制御系の構築、制御性能や運転継続可能な条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

センサにより計測した結果を利用してシステムの制御を行う場合、センサの故障は致命的な動作停止を招く場合が多い。故障しても停止が許されない用途では同じセンサを複数設置するなどの対策が取られるが、非故障時には余剰のセンサは無駄となる。

本研究では、もともとシステムに取り付けられた異種センサを組み合わせ、他の状態を推定する技術(状態推定技術)を利用することで、余剰なセンサを設けることなく、センサ故障時のバックアップとして利用する手法を提案した。この成果を人命にかかわるような停止が許さないシステムへ適用する事により、センサの故障に強いシステム構築が可能となる。

研究成果の概要(英文)：For realizing fault tolerance of a system, "Homogeneous multi-phase/multiplexing" (spare sensor is simply provided for magnetic circuits, electric circuits, sensors, etc.) is commonly used.

In order improve estimation accuracy, fault detection, and fault complementation of the fault tolerance, "heterogeneous multiplexing" ("the measured value by a certain sensor" and the estimated value by usign state estimation method from the other sensors complement each other) is proposed and the possibility is evaluated.

As a problem setting, assuming that either one of the position sensor and current sensor fails, a control system that can continue operation even at that time is proposed, and the control performance and operation condition are evaluated.

研究分野：制御工学

キーワード：モータドライブ 耐故障性 センサレス制御 パワーエレクトロニクス 電気自動車

1.研究開始当初の背景

(1) 研究者は、日本が今なお世界に対して優位性を有するモータドライブシステム技術が今後も優位性を維持するためには耐障害性向上(Fault Tolerant, Fail Safe 化)が不可欠であると考えた[1][2][3]。一般的に耐故障性向上において一般的な『磁気回路・電気回路・センサ等に単に予備を設ける「同種(ホモジニアス)的多相化・多重化」』が利用されていたが、コスト・設置スペースの問題から適用が限定的であった。

(2) 一方、システム制御では、計算機資源の低価格化を背景に、ソフトウェアにより状態推定を行い、ハードウェアであるセンサの削減を図るセンサレス制御が確立しつつあり、産業的にも幅広く普及しつつあった。

2.研究の目的

(1) 『あるセンサによる測定値』を「他のセンサを組み合わせることで得られる推定値」と相互に補完しあうことで、推定精度、故障検出、故障時の補完等を可能とする「異種(ヘテロジニアス)的多重化」による一層高度な耐故障性向上の可能性を検討する。

(2) 問題設定として、位置センサ・電流センサのいずれか一方が故障する場合を想定し、その際にも運転継続可能な制御系の構築、およびその際の制御性能や運転継続可能な条件などを明らかにすることを目的とし、故障として各センサの固着及び一定の雑音印加を想定して、いずれか一方のセンサ故障時において、継続した駆動が可能となるアルゴリズムを提案する。提案手法では、ロボットにおいて複数センサを利用した自己位置推定時に利用されるアルゴリズムを参考に、センサの値と複数の状態推定手法による推定値を相互に比較し、他の値と異なる、すなわち故障したであろう値を排除した上で統合した値を利用する「統合法」を永久磁石同期モータの電流制御系へ適用することで、いずれかのセンサ故障時にモータの駆動が継続可能となること目指す。

3.研究の方法

(1) 研究者がこれまでに培ってきたセンサレス化のための状態推定技術をはじめ、実績のある各種状態推定技術を精査・転用することで、センサ故障時も駆動可能なモータ制御系の構成を検討する。

(2) 一般化困難な故障判定とそれに伴うセンサ値・状態推定値切替に代え、故障の有無によらず常時センサ値と状態推定値の統合し適切な状態量を得る統合法を検討する。

4.研究成果

(1) 提案する PMSM 電流制御系の構成を図 1 に示す。センサと 2 つの状態推定(センサレス)技術を組み合わせることで電流センサ系(U,W 相) [4][5]・位置センサ系[6]-[9]それぞれに対して冗長化が施されており、各センサ系は今回想定する 1 か所のセンサ故障に対し駆動を継続可能な構成となっている。また各センサ系で冗長化された 3 つの値は、相互の差異と閾値を用いた重み付き平均処理を行い統合し、制御器にフィードバックしている。

(2) まず位置センサ系について実機実験によって耐故障性向上が可能なことを確認したため、報告を行う。実験結果が図 2 である。今回は実運転を想定し、モータ加減速中にトルクのステップ指令を与えるという運転を行った。図 2 中 2[sec]にセンサ測定値が 0 となる故障が発生し、そこから 8[sec]まで加速、加速中 4[sec]から 6[sec]に定格 80[%]の電流ステップ指令を与えた。同様に減速中にもステップ指令を与えている。また統合に用いた閾値は 12[deg]であり電流センサについては理想的に駆動しているものとしてセンサ測定値をそのままフィードバックしている。結果の図 2 は上から位置センサ測定値、回転速度、センサ測定値重み、推定値 1 重み、推定値 2 重み、位置統合値と位置真値の誤差、dq 軸電流値である。結果より、青色で囲まれたセンサ故障時の運転についても故障センサの影響を排

除し、制御を継続できていることが確認できる。またセンサ故障時に位置統合値の誤差の高調波成分が増加しているのは、設定した閾値以下の範囲で故障センサを統合していることに起因する。これについて統合の重みと制御性能とのトレードオフについては(5)で報告を行う。

(3)次に電流センサ系について実機実験によって耐故障性向上が可能なことを確認した実験結果を示す。実験結果が図3である。今回は一定速度一定トルクでの定常運転を想定し実験を行った。実験では速度1000[rpm]、定格80[%]の電流指令値で電流制御中に0.05[sec]でセンサ測定値が0となる故障が発生している。また統合に用いた閾値は1.5[A]であり位置センサについては理想的に駆動しているものとしてセンサ測定値をそのままフィードバックしている。結果の図3は上から制御器にフィードバックしている電流統合値、電流センサ測定値、電流推定値1、電流推定値2、統合重み、dq軸電流値である。結果より、青色で囲まれたセンサ故障時の運転についても故障センサの影響を排除することで、制御を継続できていることが確認できる。なおセンサ故障時のdq軸電流の低次高調波成分がセンサ正常時より大きくなっている理由としては位置センサ同様に閾値以下の範囲で故障したセンサを統合していることに起因する。

(5)最後に統合法において、統合の重みに傾斜を与えた場合にセンサ未故障時及び故障時の制御にどのような影響が出るかを検証する。今回検証を行う重みのパターンは全て同じ重みを用いる場合、推定値の重みをセンサ測定値の重みに比べ1000分の1に小さくした場合の2つとした。位置センサ統合に用いた閾値は12[deg]とした。様々な運転状況を考え、0.1、0.3、0.5[sec]に定格80%の電流ステップ指令を与え、0.2、0.4[sec]に無負荷状態とした。また0.25から0.45[sec]及び0.55から0.7[sec]にセンサに故障を与えている。速度は1000[rpm]で一定とした。故障についてはこれまで同様センサ測定値が0で一定となる固着状態を与えている。結果は上から位置センサ測定値、位置センサの統合排除、位置統合誤差、dq軸電流である。まず図4は全て同じ重みを用いた結果である。位置統合誤差を見るとセンサ正常時に最大5[deg]程度故障時に最大10[deg]程度の誤差が発生しており、それによって正常時にもセンサ単体で制御する場合よりも制御誤差が発生している一方で、センサ故障時には故障センサの影響を比較的小さく抑えられている。次に図5は推定値の重みをセンサ測定値の重みに比べ1000分の1に小さくした場合である。位置統合値を見ると先ほどと異なりセンサ正常時には誤差は限りなく小さくなっているが、センサ故障時には故障センサを統合する瞬間に最大10[deg]を超える誤差が発生している。以上の結果より推定値の重みを大きくするとセンサ正常時の性能は劣化するがセンサ故障時の性能は向上し、推定値の重みを小さくするとセンサ正常時の性能は向上するがセンサ故障時の性能は劣化することを確認した。

< 引用文献 >

[1]S. Anwar, L. Chen: "An Analytical Redundancy-Based Fault Detection and Isolation Algorithm for a Road-Wheel Control Subsystem in a Steer-By-Wire System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 5, pp. 2859-2869, (2007)

[2]R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolz: "Fault-tolerant drive-by-wire system", IEEE Control System Magazine, Vol. 22, No. 5, pp. 64-81, (2002)

[3]Y. Jeong, S. Sul, S.E. Schulz, Nitin R. Patel: "Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Interior Permanent-Magnet Motor Drive System for Electric Vehicle", IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL.41, NO.1, pp46-51, (2005)

[4]Y. Kawabata, T. Endo, Y. Takakura : "Three-phase Current Control by Dynamic Reconstruction of Undetected Currents for AC Motor Drives" IEEJ Transactions on Industry Applications , Vol. 135, No.10, pp. 982-992, (2015)

[5]新中新二, 他: "交流モータのための未検出電流の動的復元による三相交流電流制御法", 電気学会論文誌 D, Vol.135, No. 10, pp. 982-992, (2015)

[6]S. Ichikawa, 他: "Sensorless Controls of Salient-Pole Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 122, No. 12, pp. 1088-1096, (2002)

[7]市川真士, 他: "拡張誘起電圧モデルに基づく突極型永久磁石同期モータのセンサレス制御", 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 12, pp. 1088-1096, (2002)

[8]Y. Kawabata, T. Endo, Y. Takakura : "Study of Control for Position Sensorless and Motor Current Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drives" IEEJ Transactions on Industry Applications , Vol. 134, No.6, pp. 579-587, (2014)

[9]川端幸雄, 他: "位置センサレス・モータ電流センサレス永久磁石同期モータ制御に関する検討", 電気学会論文誌 D, Vol. 134, No.6, pp. 579-587, (2014)

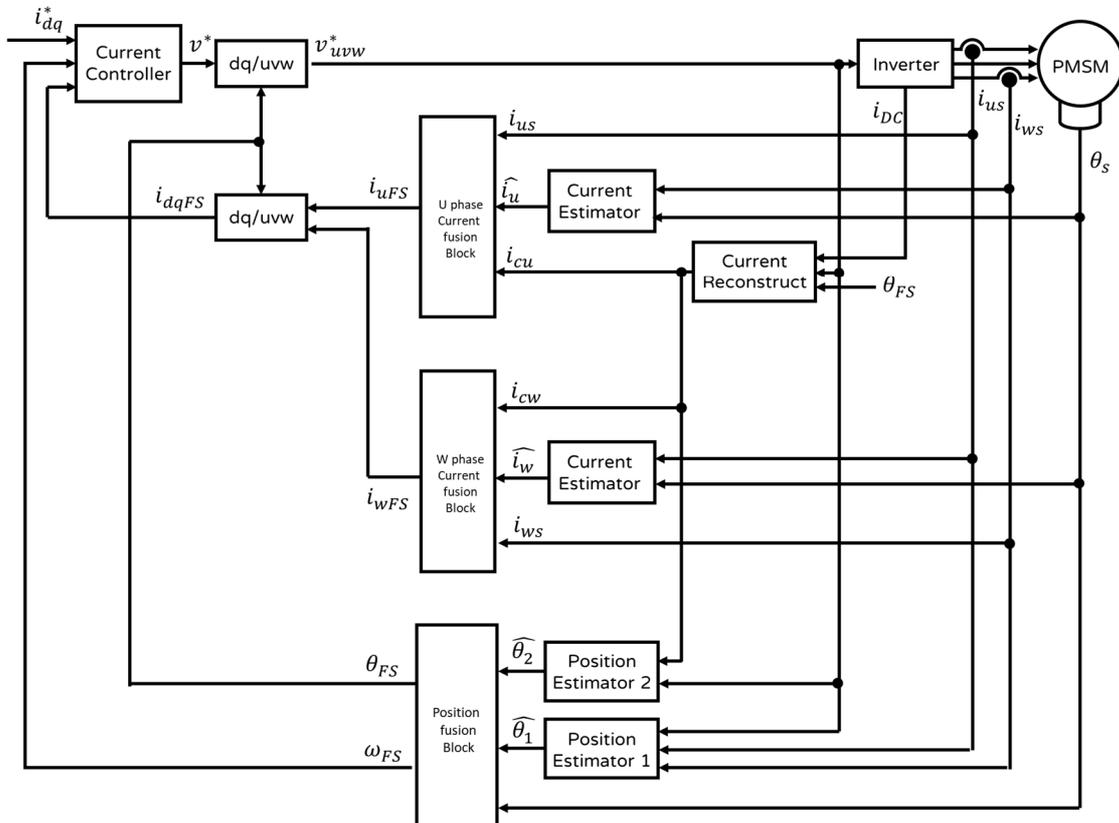


図1 提案するシステムの構成

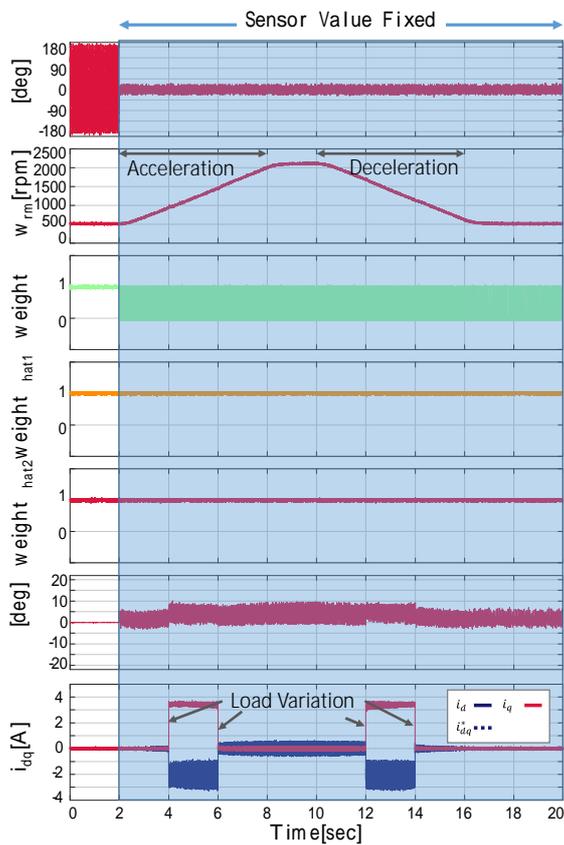


図2 位置センサ故障時の運転結果

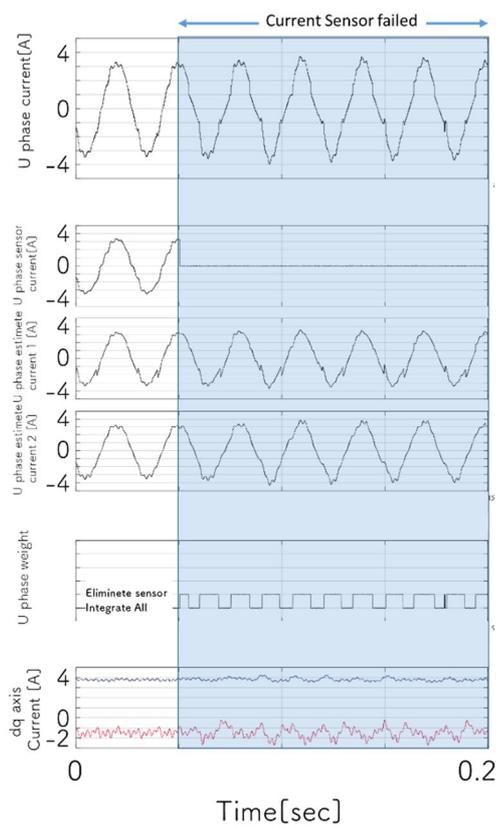


図3 電流センサ故障時の運転結果

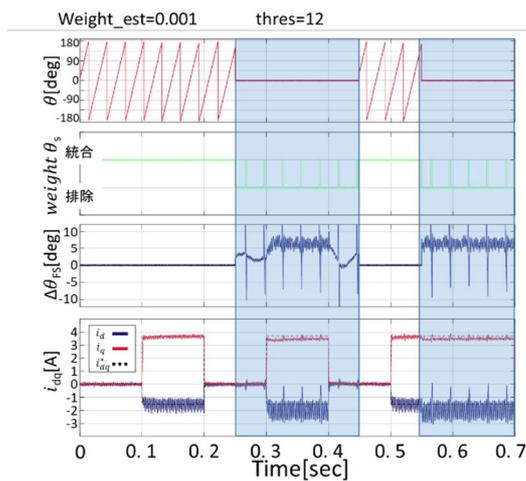


図4 統合器における重みの影響
(推定値と測定値を等しく評価)

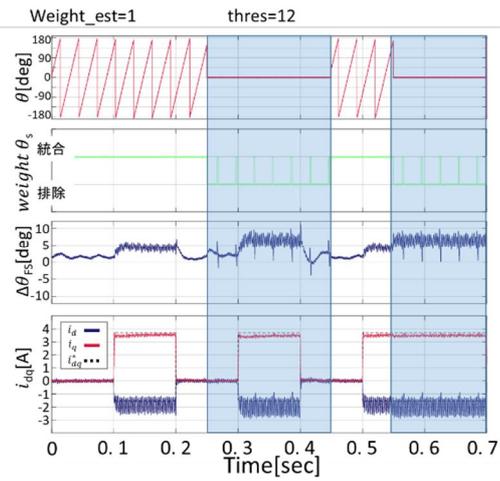


図5 統合器における重みの影響
(測定値を重視して評価)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 近藤史弥 道木慎二
2. 発表標題 位置センサレス・電流センサレス制御技術を利用した永久磁石同期モータ電流制御系のフェールセーフ化に関する検討
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀翔太 近藤史弥 道木慎二
2. 発表標題 センサと状態推定技術の組み合わせによる永久磁石同期モータ電流制御系のフェールセーフ性の検討
3. 学会等名 電気学会 半導体電力変換 家電・民生 自動車技術 合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀翔太 近藤史弥 道木慎二
2. 発表標題 状態推定技術とセンサの組み合わせによるPMSM電流制御系位置センサ系フェールセーフ化の実機検証
3. 学会等名 平成31年度電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤史弥 道木慎二
2. 発表標題 位置センサレス制御技術を利用した永久磁石同期モータ電流制御系のフェールセーフ化についての検討
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shota HORI, Shinji DOKI
2. 発表標題 Sensor Fail-Safe of PMSM Current Control System By Utilizing Current And Position State Estimation Techniques
3. 学会等名 the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

センサと状態推定技術の組み合わせによる 永久磁石同期モータ電流制御系のフェールセーフ
<http://doki-n.nuee.nagoya-u.ac.jp/member/shota-hori>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	舟洞 佑記 (FUNABORA Yuki) (20633548)	名古屋大学・工学研究科・助教 (13901)	