

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06502

研究課題名(和文) センサ・アクチュエータのオンライン保守を実現する耐故障制御を目指した研究

研究課題名(英文) Researches on fault tolerant control against simultaneous sensor and actuator failure to achieve online maintenance

研究代表者

國松 禎明 (Kunimatsu, Sadaaki)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・助教

研究者番号：30379309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、いつ起こるか不明な故障に対しては制御器の切り替えがないパッシブ法で対応し、時刻を指定できる稼働中の保守点検に対しては切り替えのあるアクティブ法で対応するハイブリッドな手法によって、耐故障性とオンライン保守性両方の実現を目指した研究である。主な研究成果はつぎの通りである。アクチュエータ故障、センサ故障、センサ・アクチュエータ同時故障のそれぞれの場合に対して、冗長入力を利用したパッシブな耐故障制御ならびに2自由度制御系を用いたアクティブな耐故障制御を提案し、オンライン保守の実現可能性についても示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、データサーバのような電子機器には24時間365日連続稼働するシステムも珍しくなく、連続稼働のためには稼働中に部品の点検・交換などの保守管理(これをオンライン保守と呼ぶ)ができるシステムであることが求められる。今後ますます多様化するニーズや高付加価値を実現するためには、機械装置であっても連続稼働できるような状況を用意しておくことが望ましいと考えられる。そこで本研究では、制御器の切り替えが伴うアクティブな耐故障制御の設計法を考案することで、機械装置であってもセンサおよびアクチュエータのオンライン保守が実現可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose a hybrid method in which passive methods without switching controllers and active ones with switching are used. Our purpose is to achieve both fault tolerance and a possibility of online maintenance by the hybrid method. The main results are as follows. For each case of actuator failure, sensor failure, and sensor/actuator simultaneous failure, we have proposed passive fault tolerant control using input redundancy and active fault tolerant control using two degree of freedom control systems. The possibility of the online maintenance has also been shown.

研究分野：制御工学

キーワード：耐故障制御 オンライン保守 センサ故障 アクチュエータ故障 センサ・アクチュエータ同時故障

1. 研究開始当初の背景

近年、データサーバのような電子機器には 24 時間 365 日連続稼働するシステムも珍しくなく、連続稼働のためには稼働中に部品の点検・交換などの保守管理(以降、これをオンライン保守と呼ぶ)ができるシステムであることが求められる。今後ますます多様化するニーズや高付加価値を実現するためには、機械装置であっても連続稼働できるような状況を用意しておくことが必要である。しかし、現在のところ完全 2 重化などの大掛かりな準備が必要であるばかりか、理論的な整備も十分とは言えない状況にあった。オンライン保守性を実現できそうな理論として、耐故障制御が提案されており、主に 2 つの方法が存在していた。1 つは故障を検出して別の系統に切り替える方法(アクティブ法)であり、もう 1 つは故障が発生することを想定して事前に制御系を構成する方法(パッシブ法)である。

これまで提案されてきたパッシブな耐故障制御は、センサ故障のような異常時における安定性の確保を目指した研究が主であり、正常時におけるオンライン保守性に焦点をあてた研究は著者らの知る限りほとんどなかった。オンライン保守性を実現する上で重要な点はセンサやアクチュエータのどこか一部を停止させても出力に影響を及ぼさないということである。これをパッシブな枠組みで実現するためには、センサ・アクチュエータが冗長性を有していることが必要である。容易に想像できる手法として、完全に多重化してしまうことであるが、これにはハードウェアコストが増大する問題と設置スペースが増大する問題があり、上記 2 つを容認できない限り現実的な選択肢ではない。

また、パッシブな耐故障制御の場合、正常時と故障時では制御対象そのものが変わるため、1 つの制御器で複数対象への安定化を図る同時安定化問題を解く必要がある。センサ数やアクチュエータ数が増えれば増えるほど、故障時におけるモデルが 1 つ 1 つ異なるため、同時安定化すべき対象が増えることとなり、問題が難しくなる。それでも、これまで同時安定化の手法に関してはいくつか提案されているが、同時にすべての性能を保証する手法は非常に難しいことが知られていた。これがこれまでオンライン保守性が難しかった主な理由と考えられた。

2. 研究の目的

著者らは、アクチュエータに 1 つ冗長性のあるパッシブな耐故障制御について研究を行っており、PID 制御を用いて制御性能を確保できる耐故障制御の設計法を提案している。この手法は故障前と故障後の「参照入力から出力までの伝達関数がほとんど変化しない」という意味において制御性能が確保できるため、これまで制御性能の保証が難しかった耐故障制御(同時安定化)では有益な結果である。そこで本研究では、この手法を基本としつつ、いつ起こるか不明な故障に対してはパッシブ法で対応し、時刻を指定できる稼働中の保守点検に対してはアクティブ法で対応するハイブリッドな手法によって、耐故障性とオンライン保守性両方の実現を目指す。

3. 研究の方法

主に 3 つに分けて研究を行った。

(1) アクチュエータ故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

入力に冗長性を持たせることで、アクチュエータ故障が発生したとしてもパッシブな耐故障制御で安定化可能な手法を検討した。また、故障発生時刻が分かることに等しいオンライン保守について、「参照入力から出力までの伝達関数がほとんど変化しない」という意味の制御性能を保証する手法を検討した。アクティブ法も導入するために、出力低下のようなアクチュエータ異常や断線故障を検出する方法も検討を行った。

(2) センサ故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

安定な制御対象に対して、センサ故障が発生した場合でも、パッシブな耐故障制御で安定化可能な手法を検討した。また、制御性能を保証するオンライン保守を実現するために、2 自由度制御系を導入し、安定性に影響しないフィードフォワード補償器の切り替えによるアクティブな耐故障制御を検討した。さらに、断線させる時刻が分かるオンライン保守以外の通常故障時でもアクティブ法を導入するために、センサ故障を自動的に検出する手法について検討を行った。その他として、故障発生後の特性変動に対応するための研究も行った。

(3) センサ・アクチュエータの同時故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

センサ故障とアクチュエータ故障が同時に発生する場合を想定し、入力に冗長性を持たせた制御対象に対して、パッシブな耐故障制御による安定化手法を検討した。また、オンライン保守を実現するために、センサ故障のみの場合と同様に 2 自由度制御系の導入を起こした。

4. 研究成果

(1) アクチュエータ故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

- A) これまで著者らは冗長入力を有する最小位相な制御対象に対して耐故障性を考慮可能な PID 制御系を提案してきた。この制御系に任意の 1 箇所アクチュエータ故障が発生したとしても、参照入力から出力までの目標値伝達関数がほぼ変化しないという意味において、制御性能が保証されることを示した。さらに、稼働中のシステムを止めることなく保守点検を可能とするオンライン保守について、保守点検の時間は事前に知り得ることを利用して、オンライン保守の実現可能性についても示した。
- B) オンライン保守の実現を念頭に、冗長入力を有するシステムを制御対象として検討してきたが、A) では相対次数が 2 以下の最小位相系（不安定系を含む）に限定されていた。そこで、並列補償器を導入することで、3 以上の高次相対次数を持つ最小位相系に対しても耐故障性を有する制御系の設計法を提案した。
- C) アクチュエータ故障では断線故障のみを想定して耐故障制御の研究を行ってきたが、実際には、アクチュエータからの出力異常も想定する必要がある。また、耐故障サーボを実現するためにはアクチュエータに冗長性を持たせる必要がある。そこで、冗長入力を用いたアクチュエータ異常に対する耐故障制御の設計法を提案し、それを応用してアクチュエータの異常箇所を特定する手法も提案した。

(2) センサ故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

- A) 安定な制御対象に対して、センサ故障が発生した場合の目標値追従性について検討した。これまで、センサ故障発生時には積分器の飽和を用いて発散することを防いでいたが、定値目標値への追従はパッシブ法ではできていなかった。故障検出を行う前提で、2 自由度制御系のフィードフォワード補償器を切り替えるアクティブ法を用いることで、サーボ系が実現できる方法を提案した。さらに、稼働中のシステムを止めることなく保守点検を可能とするオンライン保守について、保守点検の時間が事前に知り得ることは、故障検出ができることと等価であるため、オンライン保守の実現可能性についても示した。
- B) 安定な制御対象に対する 2 自由度 PID 制御系を用いた耐故障サーボでは、故障検出が可能であるという前提のもと、フィードフォワード補償器を切り替えるだけで目標値追従性を実現していた。フィードフォワード補償器の切り替えはセンサ故障発生時における制御系全体の安定性には影響しないという特徴から、積極的にセンサ故障を検出するような方法を提案した。
- C) センサ（またはアクチュエータ）故障発生後に制御対象の特性変動が起こる可能性を想定して、ニューラルネットワークを用いた簡便なシステム同定法についての検討を行った。結果的に、オートエンコーダ手法による回帰型同定法を提案し、シミュレーションによって、1 組の入出力データから瞬時にパラメトリックなモデルを求めることができることを確認した。

(3) センサ・アクチュエータの同時故障に対する耐故障制御およびオンライン保守

- A) 安定な制御対象に対して、センサ・アクチュエータの同時故障に対応可能な PID 制御系について検討した。これまで、故障のない正常時における過渡応答が必ずしも良い応答ではないため、2 自由度 PID 制御系を導入し、正常時の過渡応答を改善するだけでなく、センサ・アクチュエータの同時故障にも対応可能な方法を提案した。その際、制御対象の定常ゲインのみを用いて、2 自由度系が設計できることを示した。
- B) 安定な制御対象に対して、これまではアクチュエータの冗長化と 2 自由度制御系化により、アクチュエータ故障とセンサ故障がそれぞれ別々に発生する場合の目標値追従性は確保できていたが、同時故障までは対応していなかった。そこで、センサ・アクチュエータの同時故障が発生した場合について、定置目標値への目標値追従性について検討した。フィードフォワード部を切り替えることで、閉ループ系の安定性に影響を与えることなく、同時故障に対応可能なサーボ系の設計方法を導出した。また、シミュレーションにて同時故障発生時でもサーボ系が実現可能であることを確認した。これによってオンライン保守が実現可能であることも示した。
- C) B) はセンサ故障およびアクチュエータ故障が自動的に検出可能であることを前提としていた。そこで、センサ故障と断線故障を含むアクチュエータ異常が同時に起こり得る場合の故障検出方法について検討し、センサ故障、アクチュエータ異常ともにソフトウェア的に自動的に検出できる手法を提案した。また、その手法を用いて耐故障サーボが実現可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makiyama Kosuke, Kunimatsu Sadaaki, Motoyama Kazuki	4. 巻 -
2. 論文標題 A Design Method of 2DOF Fault Tolerant Servo Controller against Simultaneous Sensor and Actuator Failure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 1916-1920
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE48898.2020.9240242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sadaaki Kunimatsu, Kosuke Makiyama, Kazuki Motoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 On Possibility of Online Maintenance by using 2DOF Fault Tolerant Servo Control against Sensor Failure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 908-911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE.2019.8859945	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sadaaki Kunimatsuy, Kazuki Motoyama	4. 巻 -
2. 論文標題 A Design Method of 2DOF PID Controller for Systems with Simultaneous Sensor and Actuator Failure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 1195-1198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sadaaki Kunimatsu, Yoshitomo Kitajima	4. 巻 -
2. 論文標題 On possibility of online maintenance by fault tolerant PID control for systems with input redundancy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2017	6. 最初と最後の頁 1030-1032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/SICE.2017.8105777	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 牧山幸右, 國松禎明
2. 発表標題 センサ・アクチュエータの同時故障に対する故障検出と耐故障サーボに関する研究
3. 学会等名 第39回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎 一帆, 齋藤 慎之助, 國松 禎明
2. 発表標題 機械学習を用いた簡便なモデリング手法に関する研究
3. 学会等名 第38回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧山 幸右, 本山 一樹, 國松 禎明
2. 発表標題 冗長入力による耐故障制御とそのアクチュエータ異常検知への応用に関する研究
3. 学会等名 第38回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本山一樹, 國松禎明
2. 発表標題 センサ故障に対する耐故障制御を利用したオンライン保守の可能性について
3. 学会等名 第37回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牧山幸右, 本山一樹, 國松禎明
2. 発表標題 2自由度耐故障制御系に対するセンサ故障の検出方法について
3. 学会等名 第6回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北島佳智, 國松禎明
2. 発表標題 高次相対次数と冗長入力を有するシステムに対する耐故障制御について
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本山一樹, 國松禎明
2. 発表標題 耐故障性を考慮した2自由度制御系に関する研究
3. 学会等名 第36 回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北島佳智, 國松禎明
2. 発表標題 制御対象の不確かさとセンサ異常を考慮した耐故障制御
3. 学会等名 第36 回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------