

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06429

研究課題名(和文) 自己修復制御の一般化と知能化に関する研究

研究課題名(英文) Research on generalized design and intelligence of a self-repairing control system

研究代表者

高橋 将徳 (TAKAHASHI, Masanori)

東海大学・基盤工学部・教授

研究者番号：20300650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、センサ・アクチュエータの故障に起因するフィードバックループの異常を、自動的に検知・修復する機能をもつ、自己修復制御について、その一般化と知能化を実現する制御系設計法の開発を行った。具体的に、ここでは、バックステッピング法や並列補償器を導入して、自己修復制御の適用範囲を格段に拡大し、さらに、適応制御に自己修復制御機能を導入することで、故障や制御対象のパラメータ変化など、制御系に生じる種々の未知の変化に対応できる知能化を図った。また、バイラテラル制御系に自己修復制御を応用し、実験によりその有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フィードバック制御系において、センサ・アクチュエータの故障は、フィードバックループに直接影響を与えるため、制御系に致命的な障害を招く。ところが、既存の故障検知法では検知が難しい故障が存在する。自己修復制御は、不安定な検知フィルタをループ上に配置することで、これまで検知が困難とされてきた故障を正確かつ早期に検出し、安定性を常に維持することができる。本研究により、この制御の一般化と知能化が図られたことで、適用範囲が格段に拡大され、制御系に生じる未知の変化に対応できる新たな機能が備わった。安全性・信頼性に対する社会的要求に応えうる、次世代の制御法の一つになりうると期待される。

研究成果の概要(英文)：This research has developed generalized design and intelligence of a self-repairing control system (SRCS) which can automatically repair abnormal feedback-loops caused by failures of sensors and/or actuators. Concretely, using the concepts of the backstepping design and parallel compensators, applicable class of controlled plants has been significantly expanded. Furthermore, introduction of the SRC function to adaptive control could successfully construct the intelligent SRCS that makes it possible to cope with various and unknown changes and failures in the control system. In addition, the SRCS has been applied to a bilateral control system so as to find abnormality in a master-slave manipulation system, and its effectiveness has been confirmed through several experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：耐故障制御 故障検知 自己修復

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

センサ・アクチュエータの故障検知は、比較的古くから検討されてきたが、安全性・信頼性に対する社会的要求の高まりから、近年、その重要性が増している。とりわけ、制御系の信頼性は故障検知の正確さに依るため、検知に誤診がないことを理論的に示すことは極めて重要な課題と言える。これに関して、確定的手法では、制御対象の数学モデルが事前に得られているときに、例えば、状態観測器やパラメータ(故障)推定器などを用いて、正確な故障検知を理論的に保証している。ところが、実際には、実システムの数学モデルをもとめることは困難であり、上述の前提条件は、実用上、大変厳しい制約となっている。また、当然のことながら、モデルと実際との間に誤差が生じる場合は誤診が生じる恐れがある。

一方、検知が難しいとされる故障のタイプがある。固着型と呼ばれる故障がその一つである。これは、センサ・アクチュエータの出力が、入力の如何に関わらず、一定値となる故障である。制御対象の出力を目標値(セットポイント)に近づけるような、定値制御などにおいて、このような固着が発生すると、それが故障によるものか否かの判断が入出力値のみからはできない。

このような、制御系における検知の困難さの要因の一つは、故障検知器が制御ループの外に配置されていたことと考えられる。そこで、われわれは、制御系が自身のループの異常をループ上に配置した検知フィルタを用いて検知し、故障した要素をバックアップに交換する、自己修復制御を提案した(図1を参照)。この方法は、能動型耐故障制御に位置づけられるが、従来法との大きな違いは、検知フィルタに取って不安定なものを利用する点にある。これにより、制御対象の数学モデルを利用せずに、固着型を含む広範なクラスの故障を、事前に指定した時間内で検知することが可能となった。そして、自己修復制御の正確な故障検知と制御系の安定性が理論的に保証されることが示された。

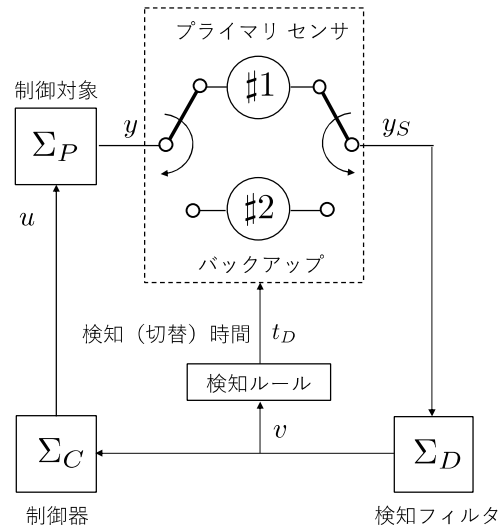


図1 自己修復制御系の基本構成

2. 研究の目的

(1) 自己修復制御の適用範囲の拡大

自己修復制御では、正確な故障検知を理論的に保証するために、1 次の不安定な非線形系を検知フィルタとして導入している。フィルタの非線形性は、そのままでは制御性能を劣化させることから、制御器にハイゲインフィードバックを用いてこの影響を抑制している。ところが、このことで、自己修復制御が適用できる制御対象のクラスが、ハイゲインフィードバック安定化可能、すなわち、相対次数が1の最小位相系に限定されている。これは、大変厳しい制約であり、実用的でないことから、本研究では、この条件を緩和する設計法を確立し、自己修復制御の一般化を図る。

(2) 適応制御の導入による制御性能の向上と知能化

ハイゲインフィードバック制御器は、非線形性に対してロバスト(頑健)に安定性を保証することができるが、固定されたパラメータを用いると、制御対象の特性変化に対して制御結果が保守的になる。そこで、本研究では、適応制御の考えを制御器の設計に取り入れ、制御器のパラメータをリアルタイムで調整する機能を備えた自己修復制御系設計法を開発する。これにより、制御対象の特性が変化しても常に制御性能を維持・向上させることができる。さらに、故障の程度に応じて、制御器の適応調整か故障した要素の自己修復かの制御戦略を自動的に選択できるような、自己修復制御の知能化が図られる。

(3) 遠隔操作型マニピュレータへの適用と実験による有効性の検討

近年、遠隔医療をはじめ、核施設の保守、危険地帯での作業などにおいて、遠隔操作型マニピュレータが導入されている。このような遠隔作業の現場では、システム内、特に遠隔に置かれたスレーブ側で、故障や不具合が発生した場合は、専門家が直接現地で修理することができない状況がほとんどである。危険な場所では人が立ち入れず、修理できないまま、余儀なく、放置せざるを得ないことも考えられる。そこで、本研究では、マスタ・スレーブ方式による遠隔操作型マニピュレータを対象として、バイラテラル制御系の自己修復制御問題について考察する。さらに、ここでは、マスタ側(操作者)の異常操作(ヒューマンエラー)の検知にも自己修復制御理論の故障検知が応用できるか、その可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) バックステップング法と並列補償器の導入による適用範囲の拡大

ここでは、自己修復制御の適用範囲を拡大するために、本研究で行われた二つの方法を示す。一つは、バックステッピング法の導入である。これは、制御対象の相対次数が2以上である場合に、相対次数分の1次のサブシステムを仮想的に考え、各サブシステムをハイゲインフィードバックによって逐次安定化していく制御系設計法である。本研究では、この方法を利用して、任意の相対次数をもつ制御対象に対して自己修復制御系を構成した(図2を参照)。その際に、検知フィルタの出力信号だけでは正確な故障検知と制御系の安定性が理論的に保証されないことが新たに判明したが、この問題が各サブシステムの出力信号を利用することで解決できることを示した。バックステッピング法の導入により、これまでの自己修復制御の利点を引き継ぎながらも、相対次数の制約を緩和することに成功した。

もう一つの方法は、並列補償器の導入である。このために、ここではまず、検知フィルタを不安定な非線系から虚軸上に極をもつ2次の線形系に変更し、故障によるループの切断をこのフィルタの共振を利用して検知する方式とした(図3を参照)。その上で、制御対象と検知フィルタの直列結合系に対して、並列に補償器を配し(図4を参照)その拡大系をハイゲインフィードバック安定化可能とするように補償器を設計した。検知フィルタを線形系にしたことで、

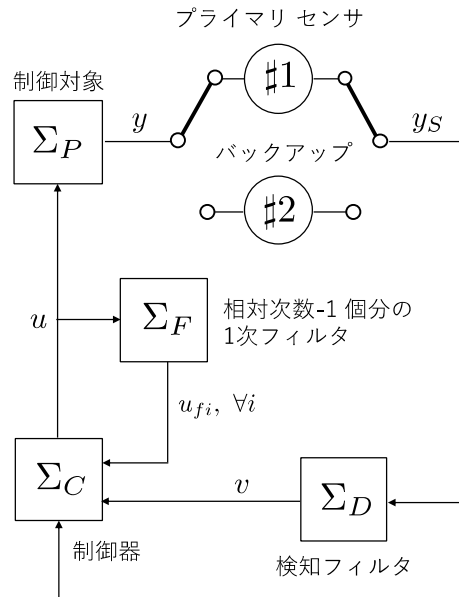


図2 バックステッピング法による自己修復制御系

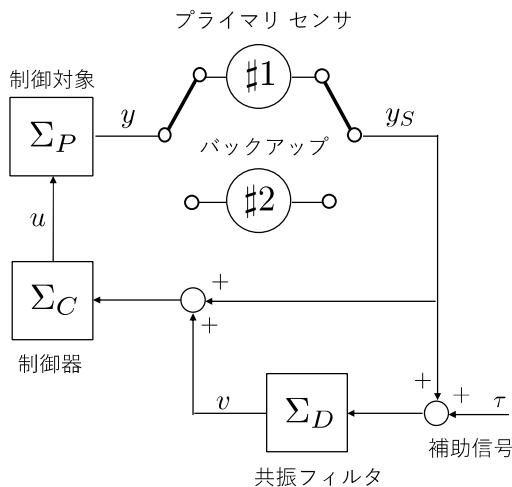


図3 共振を利用する自己修復制御系

古典的なものを含む多くの線形制御系設計理論を補償器の設計に利用することができ、補償器の設計が容易になった。また、制御対象のパラメータが正確に分かっている場合は、非最小位相系への適用も期待できる。

(2) 自己修復機能をもつ単純適応制御系設計

ハイゲインフィードバック安定化可能なパラメータ未知の制御対象に対して、単純適応制御系と呼ばれる構造の簡単な適応制御系を構築することが知られている(図5を参照)。単純適応制御は、適応ハイゲインフィードバックにより系全体を安定化しつつ、適応フィードフォワードにより規範モデル出力への出力追従を達成させることができる。自己修復制御と同じ条件を制御対象に課している点と、ハイゲインフィードバックによる安定化を図るという点で、単純適応制御と自己修復制御の親和性は非常に高い。そこで、本研究では、検知フィルタを単純適応制御系に導入し、安定性と規範モデルへの追従特性が損なわれ

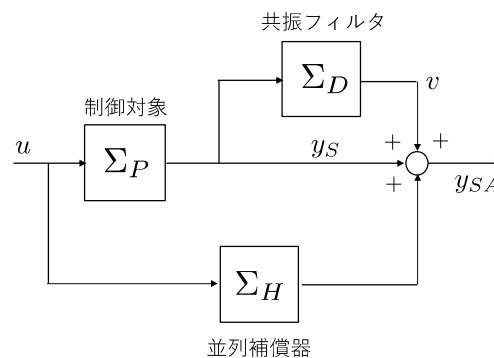


図4 並列補償器を導入した拡大系(等価変換後)

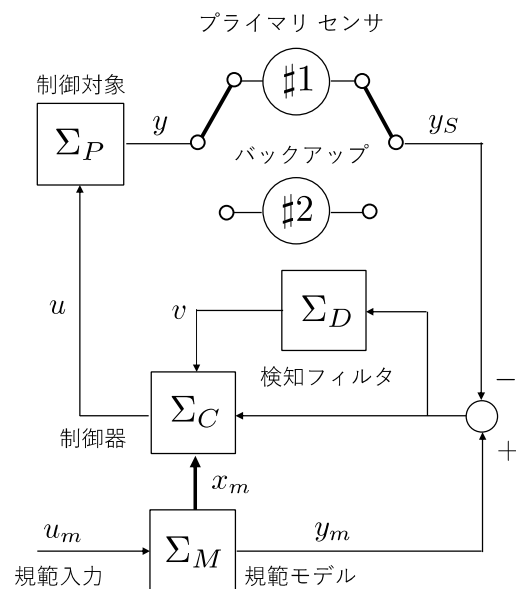


図5 自己修復機能をもつ単純適応制御系

ないように検知フィルタの構造に修正を加えた。これにより、自己修復機能をもつ単純適応制御系を構成することに成功し、結果として、制御対象のパラメータ変化と、センサ故障の両方に対応できる、インテリジェントな制御系を構成することができた。

(3) バイラテラル制御系の異常検知法

自己修復制御の考えをもとに、マスタ・スレーブ方式の遠隔操作型マニピュレータについて、対称型バイラテラル制御系の異常を検知するシステムを構築した。具体的には、マスタ側に1次の安定な線形フィルタを導入し、正常な状態でマスタの操作に極力影響を与えず、通信経路の遮断が起きたときのみ、制御系全体が不安定となるように、フィルタを設計した(図6を参照。図中の点線は遠隔通信であることを示す)。これにより、通信経路の遮断(センサの故障を含む)や操作者の意識喪失(無操作状態)などの異常が検知できることを、実験により検証した。また、補助信号をスレーブ側に印加することで、通信異常が発生した際に、通信方向のどちらに異常があるかを正しく区別できることも確認した。

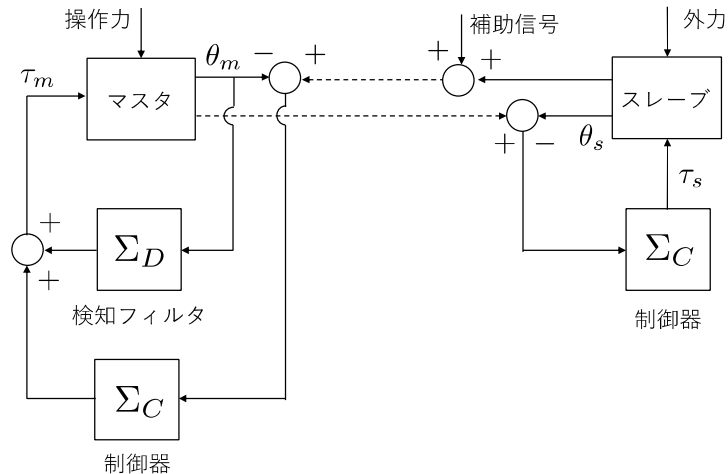


図6 異常検知機能をもつバイラテラル制御系

4. 研究成果

(1) 自己修復制御の一般化

本研究により、自己修復制御が適用できる制御対象のクラスは格段に拡大された。ハイゲインフィードバック安定化条件のなかで、相対次数に関する制約は緩和され、相対次数が既知であれば、任意の相対次数をもつ制御対象に自己修復制御系を構成することができる。さらに、制御対象のパラメータが既知であれば、並列補償器の導入により、非最小位相系への適用も期待できる。また、ここでは詳しく示していないが、複数の入出力をもつ多入出力系についての考察もすでにはじめており、分散型自己修復制御や集中型の自己修復PI制御などの提案を行っている。以上、適用範囲の拡大という点で、本研究により、自己修復制御の一般化は、飛躍的に進んだと言える。ただ、非線形の制御対象についてはほとんど考察しておらず、この点は今後の課題としたい。

(2) 自己修復制御の知能化

本研究で考案された、自己修復機能をもつ単純適応制御系は、故障や不具合、制御対象のパラメータ変化など、制御系に生じる種々の未知の変化に柔軟に対応できる。その意味で、自己修復制御の知能化の目的は、部分的ではあるが達成されたと言える。しかしながら、一方で、自己修復制御は、依然として、故障に対して事後処理的な機能しか持ち合わせていない。今後は、人工知能や機械学習などの統計的手法を併用して、故障や不具合の予兆検出について検討を行いたい。なお、本研究では、単純適応制御の他、適応型PID(比例・積分・微分)制御にも自己修復制御を応用している。PID制御は、現在、最も汎用されている制御法であり、これは知能化のみならず一般化にも寄与していることを付記しておく。

(3) 今後の展望

生物の機能を模倣する、バイオミメティックな視点から自己修復の研究を進めることは大変興味深い。本研究では、神経細胞などの活動電位の振る舞いを表現するスパイクニューロンモデルを検知フィルタとして利用する方法について検討をはじめている。ニューロンモデルで構成された検知フィルタは、故障に対してセンシティブで、かつ、ミリ秒単位の高速度な早期検知が可能である。さらに、フィルタそのものが安定系であるため、制御系全体は強安定となる。自己修復制御の知能化の新たなアプローチとして期待できることから、今後も研究を継続していく予定である。

また、近年、サイバーフィジカルシステムやIoT (Internet of Things)などを背景に、制御系のネットワーク化が加速的に進んでいる。本研究でもこのような時代の趨勢を鑑み、通信コストを削減するための一手法として注目されている、イベントトリガ制御に自己修復制御を応用する試みについて検討をはじめている。現在は、センサ故障に限定しているが、今後は、アクチュエータ故障や通信異常などの検知・修復に研究範囲を広げ、考察を深めて行きたい。

<引用文献>

R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolzl: Fault-tolerant, drive-by-wire systems, IEEE Control Systems Magazine, Vol.22, No.5, 2002

高橋：故障による不安定化を利用した自己修復制御、システム/制御/情報、第58巻、第3号、2014

高橋：故障時に有限発散時間を利用する自己修復追従制御、計測自動制御学会論文集,第50巻、第3号、2014

F. Allgower, J. Achman and A. Ilcman: High-gain adaptive tracking for nonlinear systems, Automatica, 33, 5, 1997

M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P. Kokotovic: Nonlinear and adaptive control, John Wiley & Sons, NY, 1995

H. Kaufman, I. Barkana and K. Sobel: Direct adaptive control algorithms - Theory and applications, Springer, 1998

岩井、水本、大塚：単純適応制御 SAC、森北出版、2008

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Masanori Takahashi	4. 巻 14
2. 論文標題 A SELF-REPAIRING FUNCTION EXPLOITING RESONANCE FOR HIGH-GAIN ADAPTIVE CONTROL WITH FAULTY SENSORS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Innovative Computing, Information and Control	6. 最初と最後の頁 2141 ~ 2150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24507/ijicic.14.06.2141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 高橋将徳	4. 巻 1411
2. 論文標題 故障から自己修復するPI型適応制御系	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会技術報告書	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
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 無
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 Takahashi Masanori	4. 巻 予稿集
2. 論文標題 Simple adaptive control for plants with unknown sensor failures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeeding of 2017 11th Asian Control Conference (ASCC)	6. 最初と最後の頁 999 ~ 1004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ASCC.2017.8287307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masanori Takahashi	4. 巻 10
2. 論文標題 Self-repairing control using adaptive adjusting laws	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters	6. 最初と最後の頁 2801 ~ 2806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24507/icicel.10.12.2801	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 高橋将徳	4. 巻 30
2. 論文標題 FitzHugh-Nagumoモデルを用いる自己修復制御	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 128 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.30.128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Masanori	4. 巻 予稿集
2. 論文標題 Self-repairing control for plants with high relative degrees	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)	6. 最初と最後の頁 184 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ADCONIP.2017.7983777	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Masanori	4. 巻 52
2. 論文標題 Simple Adaptive Control Against Sensor Failures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 55 ~ 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.12.621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Masanori	4. 巻 5
2. 論文標題 Self-repairing Adaptive PID Control for Plants with Sensor Failures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics, Networking and Artificial Life	6. 最初と最後の頁 110 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2991/jrnal.2018.5.2.8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Masanori	4. 巻 6
2. 論文標題 Izhikevich Model-based Self-repairing Control for Plants with Sensor Failures and Disturbances	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics, Networking and Artificial Life	6. 最初と最後の頁 105 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2991/jrnal.k.190828.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件(うち招待講演 0件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 高橋将徳
2. 発表標題 Izhikevichモデルを利用する分散型自己修復制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新山友宏、高橋将徳
2. 発表標題 対称型バイラテラル制御系の異常検知
3. 学会等名 計測自動制御学会 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 高橋将徳
2. 発表標題 センサ故障に対する分散自己修復制御
3. 学会等名 電気学会 制御研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋将徳
2. 発表標題 Izhikevichモデルを用いる自己修復制御
3. 学会等名 第59回自動制御連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高橋将徳
2. 発表標題 FHN系の同期を利用する自己修復制御
3. 学会等名 第4回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masanori Takahashi
2. 発表標題 Self-repairing PI control for MIMO systems with multiple sensor failures
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2019 (SICE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Niiyama Tomohiro and Masanori Takahashi
2. 発表標題 Anomaly detection for a symmetric bilateral control system
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2019 (SICE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Takahashi
2. 発表標題 Actuator fault-tolerant control using a spiking neuron model
3. 学会等名 The 2020 International Conference on Artificial ALife and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋将徳
2. 発表標題 センサ故障に対するイベントトリガ自己修復制御
3. 学会等名 第7回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020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