

閉ループ制御システムに対する異常シナリオ分析のための情報検索

Information Retrieval for Failure Scenario Analysis

of Closed-Loop Control Systems

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第三研究ユニット

Japan Aerospace Exploration Agency, Research and Development Directorate, Research Unit III

○小口 一浩 梅田 浩貴¹⁾ 植田 泰士¹⁾ 片平 真史¹⁾ 森崎 修司²⁾

○Kazuhiro Oguchi Hiroki Umeda¹⁾ Yasushi Ueda¹⁾ Masafumi Katahira¹⁾ Shuji Morisaki²⁾

Abstract In a closed-loop control system, the state and transition order of "observation and control" and the conditions of the physical environment. It is necessary to identify possible failure scenarios from innumerable combinations of, which are difficult to identify. This presentation is based on a query that links observation and control with a causal relationship to physical quantities. We propose a method to identify failure scenarios by searching past failure knowledge of scenarios, and identifying operating conditions from the search results. At the same time, we will introduce the experimental results that identified the abnormal scenario by applying the proposed method to the actual system.

1. はじめに

エンジン制御システム^[1]、宇宙機システム^{[2][3]}、飛行システム^[4]を始めとした閉ループ制御システム(図1)に対し、システム障害を引き起こしうる「異常シナリオ」を識別するための分析(異常シナリオ分析)が行われている^{[5][6]}。

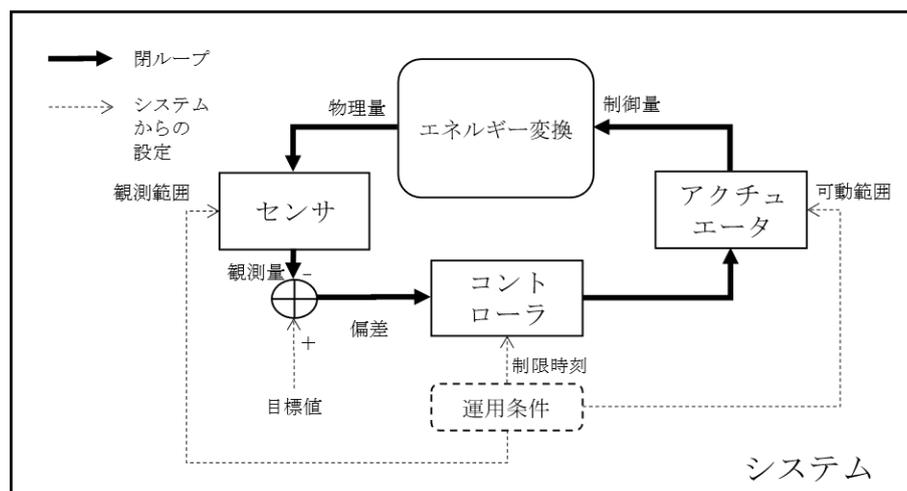


図1: 閉ループ制御システム構造図

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第三研究ユニット

Research Unit III, Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

茨城県つくば市千現 2-1-1 Tel: 050-3362-2805 e-mail: kazuhiro.oguchi@jaxa.jp

2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, Japan

1) 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第三研究ユニット

Research Unit III, Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

2) 名古屋大学 大学院情報学研究科

Graduate School of Informatics, Nagoya University

【キーワード:】 過去知見の検索、異常シナリオ、閉ループ制御、自然言語処理、クエリ拡張、機械学習

閉ループ制御システムとは、与えられた運用条件（物理量を更新する制限時間、センサの観測範囲の制限、アクチュエータの可動範囲の制限）に違反しない様、アクチュエータがエネルギー変換を行う事により物理的な作用を行い、観測量と目標値との差分（偏差）を所定の値以下にするよう制御するシステムを指す。^[7]

このようなシステムにおける異常の検知は、機器の故障だけではなく、運用時に運用条件が変更されることで偏差がどのように変化しているか、を確認する。異常シナリオの分析者が運用条件についての知識を持たない時、分析者は過去の知見からどのような「運用条件の変更」がありうるか、を参照することが必要である。しかし、過去の知見にある「運用条件の変更」は、システム固有の表現になっており、分析者が該当する表現を検索するキーワードであるクエリとして作成することができない課題が発生した。

本稿では、閉ループ制御システムに対する運用条件の変更を識別することを目的とした、情報検索の方法を提案する。情報検索の方法は、ガイドワードで導出した「偏差の異常パターン」をクエリに追加する方法（拡張クエリ）である。

2. 閉ループ制御システムの運用条件の変更に対する異常シナリオ

閉ループ制御は、物理量を更新することで観測量と目標値の偏差を、制限時間内に所定の値以下とする制御であるため、以下のタスクを周期的に実行している。

- ・観測タスク：センサによって観測した観測量と、予め設定した目標値の差分を、偏差として計算するタスク
- ・制御タスク：制御アルゴリズムが、入力された偏差を基にアクチュエータによってエネルギー変換を行うための制御量を計算するタスク

コントローラ内にある制御アルゴリズムは、システムが正常に動作できるよう運用条件を設定されている。本稿では典型的な以下の条件1～条件3を運用条件と仮定する。

運用条件の変更は、制限時間内に所定の値を満たせない偏差が発生させ、運用条件への違反による異常^{[8][9]}を引き起こし、異常シナリオへの分岐に繋がる。

条件1：外部環境によって、センサの観測時間および観測範囲を制限する条件。

（例：トンネルを走行している間、車はGPS信号を使えない。）

条件2：外部環境によって、アクチュエータの可動時間と可動範囲を制限する条件

（例：高速走行中、車のハンドル操作は短時間で操舵角を大きく変更出来ない。）

条件3：偏差を所定の値以下とすべき所要時間を制限する条件

（例：高速道路で本線への合流時、合流点に到達する制限時刻までに、先行車両との速度差を一定値以下にしなくてはならない。）

運用条件の変更は、外部環境や目標値の変更によって発生するため、以下の異常パターンを閉ループ上の偏差で検知する必要がある。

異常パターン①：偏差は目標値の更新によって観測範囲から逸脱する事

異常パターン②：偏差は目標値の更新によってアクチュエータの動作限界から逸脱する事

異常パターン③：制限時刻（目標値に観測量を一致させる時間制限）から逸脱する事

しかし、運用条件の変更を識別する分析作業は、外部環境の変動、制限時刻や目標値の変更、となるシナリオを特定する、且つ、システムのシナリオは多数存在するため、属人性が高い分析となっている。

3. 過去知見に対する情報検索の課題

先行研究では、波平らは、異常シナリオの発想支援のための検索システムを提案している。当該研究は、検索対象となる過去知見は、Word2Vec^[11]などの自然言語処理により言語モデルへと変換し、単語の記載頻度、共起性（ある単語がある文章中出现したとき、その文章中に別の限られた単語が頻繁に出現する性質）から過去知見を検索している。

クエリは、異常シナリオの分析者に対しシステムの前提条件を含めた異常シナリオ導出経緯（Goal Structuring Notation^[12]、以下「GSN」という）を生成している^[13]。そのため、クエリの生成は、分析者に依存しており、検索対象となるシステムの特性に合わせて補正する事は行っていない。

先行研究を、閉ループ制御システムに対して適用した場合、分析者は分析対象シナリオ毎に定まる観測タスクや制御タスクをクエリとして設定する。当該クエリでは、センサやアクチュエータの情報しか含まれていないため、単語の記載頻度、共起性により、機器故障に起因する異常を示す過去知見が優先的に検索されてしまい、結果、閉ループ制御システムの運用条件の違反を示す検索結果を容易に引き当てられない課題があった。また、分析者は、閉ループ制御システムの運用条件に関する知識を保有していない事があり、この場合、クエリに当該のキーワードが含まれる事は難しい。しかし、閉ループ制御システムは、偏差における異常パターンは個別のシステムに依存せず制御アルゴリズムから共通にとらえることができるとされている^[8]ため、異常パターンの類義語を用意する事により、検索結果を改善出来る余地がある。また、異常パターンから運用条件の違反を特定するためには、特定の因果関係がセンサやアクチュエータを絞り込みクエリに含める事で検索精度を高める余地が残っている。

4. 提案手法

3項で述べた課題を解決するために「ガイドワードによるクエリ拡張」を行う手法を提案する。（以下、提案手法と呼ぶ）。提案手法は、以下に説明する工夫点により、分析者による目標値や物理量の特定を支援し、運用条件の変更を検索するための拡張クエリを作成する事が出来る。

4.1 提案手法の工夫点

観測タスクと制御タスクに共通する物理量や目標値の情報が文言として明記されていないクエリを拡張するため、工夫点は以下である。（図2）

閉ループ制御システムは、分析対象シナリオ毎に観測タスクと制御タスクを定めた時、制御タスクが制御アルゴリズムに基づきエネルギー変換を行い、観測タスクが出力された物理量を観測し、目標値からの差分により偏差を計算する特徴がある。このため、共通の物理量、目標値、エネルギー変換、制御アルゴリズムに着目して拡張クエリの作成を行う。

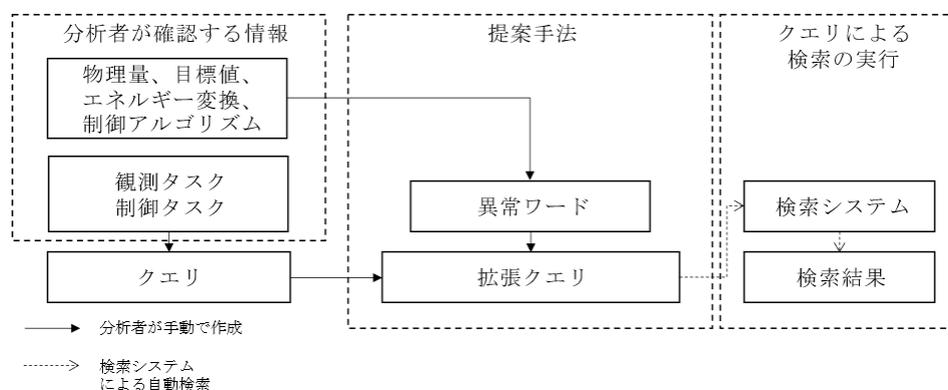


図2：提案手法の概要

閉ループ制御システムの異常は運用条件の変更によって発生し、システムが目標値と観測量の

偏差を確認する事により検知される。よって、運用条件の違反を含む検索結果を得るために、拡張クエリは、分析対象シナリオ上で同じ物理量に対して動作するセンサとアクチュエータの情報（観測タスク、制御タスク）を含み、目標値と観測量の偏差の異常パターンを示す単語を異常ワードとして含む必要がある。

提案手法では、予め閉ループ制御システムで用いられうるエネルギー変換の候補および制御アルゴリズムの候補に合わせた異常パターン表現を用意し、拡張クエリの生成を方法としている。さらに、エネルギー変換の種類および制御アルゴリズムの種類毎に用意される異常パターン表現は、汎用的ガイドワードに対しエネルギー変換パターンを組み合わせる事で、網羅性を確保した。また、制御アルゴリズムの専門性を持たない分析者が、分析対象のエネルギー変換に対応した、汎用的ガイドワードを参照する事で制御アルゴリズム固有の異常パターンを特定し、異常ワードとしてクエリに追加する事が出来る。

4.2 提案手法の実施手順

提案手法を実施する手順（図3）は以下である。

- 手順1：コントローラ内にある制御アルゴリズムから出力される値の異常パターンを定義する
- 手順2：エネルギー変換のドメイン分類毎に異常パターンのドメイン表現を定義する
- 手順3：分析対象シナリオ毎に定まる物理量および閉ループの構成要素^{※2}を選択する
- 手順4：閉ループの構成要素が扱うエネルギー変換の種別を選択し、種別より特定された異常パターンのドメイン表現に対し、分析者が異常ワードを定義する

但し、手順1および手順2は、エネルギー変換の制御アルゴリズムのドメイン知識を持ったエキスパートが、異常シナリオ分析の事前実施するものとする。以下に手順を示す。（図3）

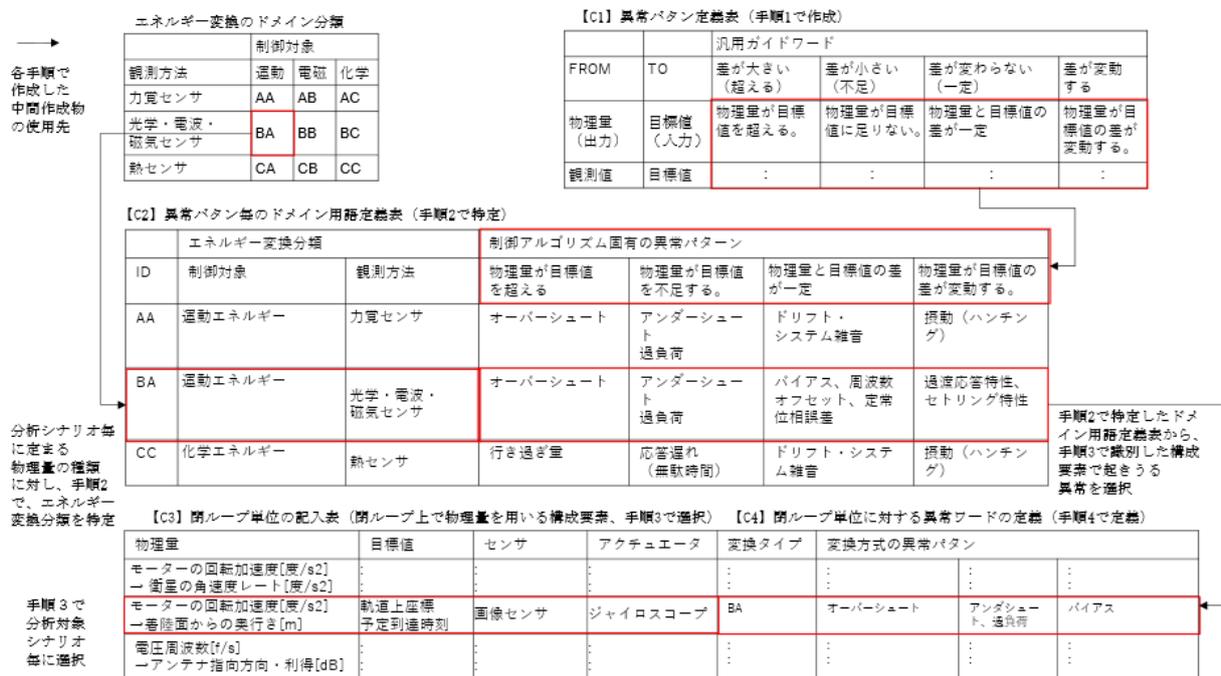


図3：提案手法の手順

手順1は、偏差を所定の値以下にする事を目的とする閉ループ制御システムに対し、制御で起こりうる異常パターンを汎用版のガイドワードとしてエキスパートが定義する。本ガイドワードは、制御アルゴリズム（例：PID制御）^{[8][9]}に対して論理的な漏れや重なりがないよう定義する。

手順2は、異常パターン定義表に対し、エキスパートがエネルギー変換のドメイン分類ごとの固有表現^[10]をドメイン用語定義表として作成する。閉ループ制御に対する知見を持たない分析者が

ドメイン用語定義表の文言を援用して、観測タスクおよび制御タスクで共通のパラメタをクエリに追加する事が出来る。

手順 3 は、分析対象シナリオ内にある物理量を特定した分析者が、物理量を制御する閉ループ上の構成要素（センサ、アクチュエータを含む）を選択する。この選択に伴い、観測タスクと制御タスクも特定される。

手順 4 は、分析者が閉ループ上の構成要素を確認する。その後、各構成要素が起こしうる異常パターンから異常ワードを選択する。

分析者は、手順 4 で得られた異常ワードと手順 3 で得られた観測タスクや制御タスクを拡張クエリとして用い、過去知見の検索を行う。

5. 評価

5.1 評価指標

提案手法の有効性を評価するため、クエリの生成に属人性があり、閉ループ制御システム特有の異常シナリオを検索する事が出来ない課題に対して、以下の評価指標を設定した。

評価指標 1：クエリは同じ物理量を扱うセンサやアクチュエータ等の異常ワードを含むか？

評価指標 2：検索結果は、運用条件の違反となる異常パターンを含むか？

評価指標 3：分析者は、検索結果から閉ループ制御システムの異常シナリオが作成出来るか？

表 1：評価指標 1 の内容

ID	評価項目の内容
A-1	クエリは、閉ループ上のセンサ・アクチュエータ・物理量を示す異常ワードを含むか？
A-2	クエリは、閉ループ上でエネルギー変換を実行する機器の異常ワードを含むか？
A-3	クエリは、偏差の異常パターンを示す異常ワードを含むか？

表 2：評価指標 1 の水準定義

	A-1	A-2	A-3
水準 1	×	×	×
水準 2	○	×	×
水準 3	○	○	×
水準 4	○	○	○

凡例：「○」は含む。「×」は含まない。

表 3：評価指標 2 の水準定義

ID	評価項目の内容
B-1	検索結果は、偏差は目標値の更新によって観測範囲から逸脱している内容を含むか？
B-2	検索結果は、偏差は目標値の更新によってアクチュエータの動作限界から逸脱している内容を含むか？
B-3	検索結果は、偏差は目標値の更新によって制限時刻（目標値に観測量を一致させる時間制限）から逸脱している内容を含むか？

表 4：評価指標 2 の水準定義

	B-1	B-2	B-3
水準 1	×	×	×
水準 2	△	△	△
水準 3	○	○	○

凡例：「○」は含む。「△」はいずれか1つを含む。「×」は含まない。

表 5：評価指標 3 の水準定義

水準	水準の内容
1	異常シナリオは、観測、制御の運用条件の違反を含まない。
2	異常シナリオは、観測、制御の運用条件の違反のどちらかを含む。
3	異常シナリオは、観測、制御の運用条件の違反の両方を含む。

5.2 評価の条件

提案手法によって属人性の低下と検索精度を向上させる事が出来ているか評価するため、以下の条件で評価を行った。(比較した手法の内容は表 7 を参照の事。)

評価指標 1 では、拡張前のクエリの品質の有効性への影響を排除するため、共通のクエリ 10 個に従来手法 2、提案手法を適用し拡張クエリを生成した。また、異常ワードが拡張クエリに反映されている事を確認するため、従来手法 2 のみを比較対象とした。

評価指標 2 については、検索自体の有効性への影響を排除するため、クエリ数および検索結果数を同数とし、従来手法 1、従来手法 2、提案手法における検索結果を評価した。

評価指標 3 では対象システムの特性和実施順序性の有効性への影響を排除するため、分析対象や実施順序を考慮し評価条件を設定した。

表 6：評価時の条件

評価指標	対象システム	実施者	検索対象データ	クエリ生成数	検索の結果数	異常シナリオ作成順
1, 2	エネルギーの変換方法が変動するシステム	1 名 (※3)	1612 件	10 件	100 件	-
3	外部環境が変動するシステム	2 名 (※3)	136 件	4 件	8 件	1. 従来手法 1 2. 従来手法 2 3. 提案手法

(※3) 閉ループ制御の設計業務の経験なし

表 7：比較した手法

	従来手法 1	従来手法 2
名称	拡張なしクエリによる検索	一般的な拡張クエリによる検索
手法概要	先行研究 ^[13] の適用で得たクエリを用いる。	従来手法で得たクエリに被験者の判断で類義語を追加し、拡張クエリとして用いる。
クエリの生成方法	センサによる観測方法やアクチュエータによる動作方法から生成	従来手法 1 で用いた観測方法や動作方法の類義語を追加

5.3 評価結果

評価指標 1 の結果を図 4、評価指標 2 の結果を図 5、評価指標 3 の結果を図 6 に示す。

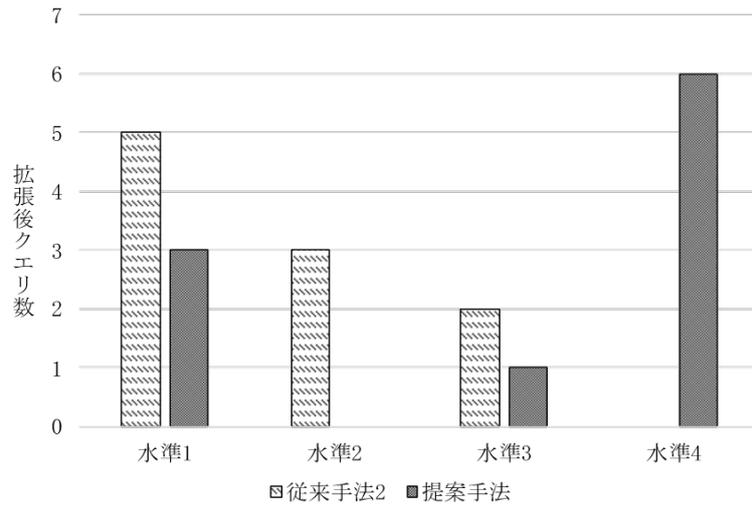


図 4：評価指標 1 の結果（異常ワードを含むクエリの水準）

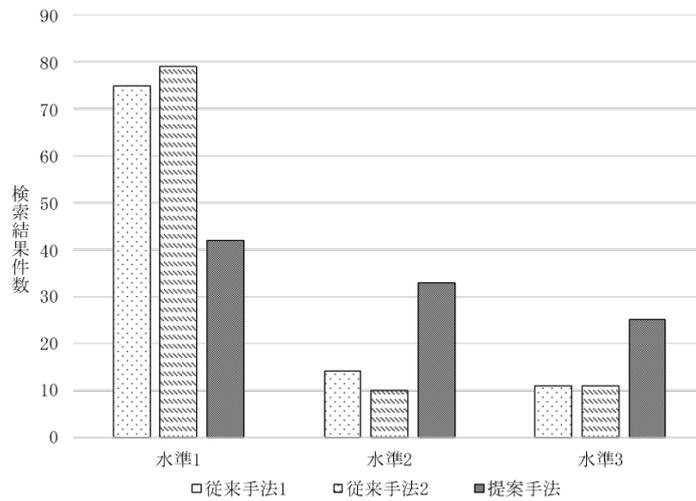


図 5：評価指標 2 の結果（検索結果の水準）

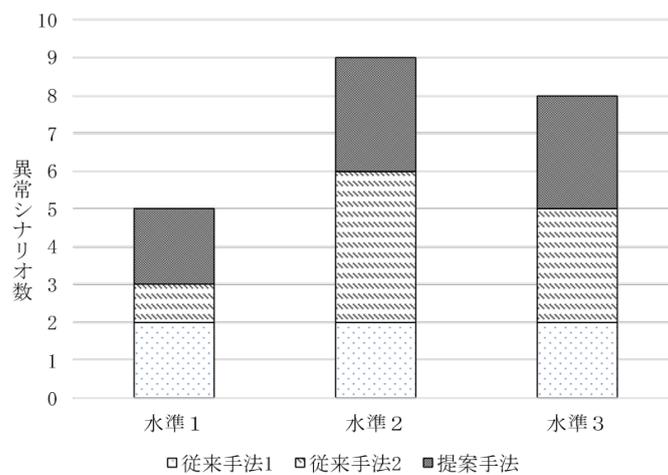


図 6：評価指標 3 の結果（異常シナリオ数）

5.4 考察

評価指標 1 では、水準 1~3 で提案手法が従来手法 2 に対しクエリ数の減少となっているのに対し、水準 4 では逆に増加となっている (図 4)。この結果は、4.1 項で示した通り提案手法が偏差の異常パターンを示す異常ワードをクエリへ含まれている事を示している。一方、提案手法で分析者が閉ループ上の物理量を特定できず、水準 1 となった拡張クエリが存在する。分析者が分析対象シナリオから物理量を特定し、クエリに含めるための手順の検討が今後の課題となる。

評価指標 2 では、水準 1 で提案手法が従来手法 1 や 2 に対し検索結果数の減少となっているのに対し、水準 2~3 では逆に増加となっている (図 5)。この結果は、4.1 項で示した通り提案手法が運用条件の違反となる異常パターンを検索する事が出来ている事を示している。一方、提案手法でも水準 1 の検索結果が得られており、検索精度も候補に含めた原因の特定が今後の課題となる。

評価指標 3 では、従来手法 1、従来手法 2 の後に提案手法を実行したにもかかわらず、すべての水準で、異常シナリオを追加する事が出来ている (図 6)。この結果は、4.1 項で示した通り提案手法による検索結果が、運用条件への違反を引き起こす閉ループ制御システム固有の異常シナリオの識別に対して効果的であった事を示している。一方、いずれの手法でも運用条件の違反を含まない異常シナリオが作成されており、属人性の影響を確認するために、エキスパートによるクエリ拡張および検索結果との差を調査する必要がある。

6. 今後の課題

複数の閉ループ構造と複数の物理量を持つ動的システム^[9]に対しても、クエリ拡張のための物理量を特定可能な提案手法を検討する。異常ワードに対する分類を言語モデルへ付与する方法での検索精度向上を検討する。エキスパート分析結果との比較評価を行い属人性の影響を確認する。

7. 謝辞

本研究評価にご協力頂いた有人宇宙システム株式会社 柿本様、各位へ謹んで感謝の意を表す。

8. 参考文献

- [1] 鷲野 翔一, ITS と自動車制御, 計測と制御, 第 43 巻, 第 3 号, 2004
- [2] 植田 聡史 他, 高精度月着陸のための航法誘導制御技術, 計測と制御, 第 57 巻, 第 4 号, 2018
- [3] 岩田 隆敬 他, 恒星センサを用いた地球指向衛星姿勢決定系のフィールド試験, 日本航空宇宙学会論文集, 第 56 巻, 第 657 号, 2008
- [4] 電子情報通信学会, 航空システム, 知識ベース 11 群 2 編 (電子航法・ナビゲーションシステム) 1 章, 第 1 巻, 2011
- [5] IPA, 大規模・複雑化した組込みシステムのための障害診断手法 - モデルベースアプローチによる事後 V&V の提案, pp.11-35, 2018
- [6] IPA, はじめての STAMP/STPA (活用編), pp.12-40, 2016
- [7] 須田 信英 他, PID 制御, 日本ファジィ学会, 第 7 巻, 第 4 号, 1995
- [8] K. J. Astrom and T. Hagglund, PID Controllers : Theory, Design, and Tuning, Instrument Society of America, 1995
- [9] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, pp.227-302, Prentice-Hall, Inc.
- [10] 森 剛志 他, ID オートチューニングコントローラの動向, 計測と制御, 第 29 巻, 第 8 号, 1990
- [11] Mikolov Tomas, et al. Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint arXiv:1301.3781, 2013.
- [12] GSN COMMUNITY STANDARD VERSION 1 (<http://www.goalstructuringnotation.info/>)
- [13] 波平 晃佑 他, 自然言語処理による情報検索を用いた故障発想支援の提案, ソフトウェア品質シンポジウム, 2020