

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06893

研究課題名（和文）タグチメソッドによる宇宙構造制御系の異常診断と振動制御に関する研究

研究課題名（英文）Fault diagnosis and vibration control of space structure/control systems using the Taguchi method

研究代表者

大久保 博志 (Okubo, Hiroshi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：40094502

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）：将来の宇宙科学ミッションのためにX線天文衛星などの超高精度宇宙構造物への適応構造（スマート構造）の応用が研究されているが、このような超高精度宇宙構造物の信頼性を確保するためには、先進的な異常診断システムを導入する必要がある。本研究では、振動応答データを用いて損傷を検出するスマート構造の自己診断問題に、タグチメソッド（マハラノビス-タグチシステム）を適用した。本診断法は診断対象の精密モデルが不要のため、環境の変化に対してロバスト性があり、軌道上での診断に適している。ANSYSを用いた数値シミュレーションおよびスマートはりの実験室モデルを用いた診断実験を行い、提案する異常診断法の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙機システムの運用においては高度な異常診断技術は必要不可欠である。様々な診断データを人間が判断することは宇宙機のような複雑なシステムでは限界があり、自律的な異常診断が必要とされる。タグチメソッドは本来品質工学と呼ばれ、異常診断にこの考え方を適用したものがMTシステム（マハラノビス・タグチ法）であり、医療、宇宙、自動車、経営などの幅広い分野で利用されている。本研究ではMTシステムを用いた異常診断法に着目し、センサーやアクチュエータを内蔵し、形状の精密制御や振動制御などの高度の機能を持つ適応宇宙構造物に適用することを目的として、自己診断による異常検出の方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：The application of adaptive structures (smart structures) in ultrahigh precision space structures such as X-ray astronomical satellites is being studied extensively for future space science missions. To ensure the reliability of such ultrahigh precision space structures, it is necessary to introduce an advanced fault diagnosis system. In this study, the Taguchi method (Mahalanobis-Taguchi system) is applied to the self-diagnosis problem, wherein a damage in the smart structure is detected using the vibration response data. Since this diagnostic method does not require a precise model to be diagnosed, it is robust against environmental changes and is suitable for on-orbit diagnosis. We conducted a numerical simulation using ANSYS and a diagnostic experiment using a smart beam model in the laboratory to verify the effectiveness of the proposed fault diagnosis method.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：異常診断 タグチメソッド MTシステム スマート構造 適応構造 高信頼度システム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙科学の最先端の観測ミッションにおいては、例えば1秒角の指向精度、0.03秒角/分の姿勢安定を実現する超高精度宇宙構造は将来の宇宙科学のキーテクノロジーである。このような要求に対して、「スマート構造」技術が果たす役割は大きいと考えられる。衛星の指向精度の超高精度化、衛星構造の低熱歪み化と衛星の微小振動の絶縁、いずれも非常に要求度の高い分野であるが、受動的な設計でしのいでいるのが実態である。「スマート構造」技術は、このような将来の宇宙科学ミッションに要求される超高精度宇宙構造物の実現に大きく貢献することが期待されている。このような科学ミッションにおいて、宇宙機の姿勢制御システム、構造制御システムは非常に複雑な階層的制御システムとなることが予想される。その際にシステムの保全をいかにして行うかが課題であり、本研究ではその基礎技術の開発に資することを目的としている。

2. 研究の目的

将来のX線天文衛星など科学衛星ミッションでは、超高精度で信頼性の高い宇宙構造物の実現が必要とされており、そのための革新的技術の開発が望まれている。宇宙機・人工衛星の形状を精密制御し、構造振動を抑制する方法として「スマート構造・知的適応構造」の導入やアクティブ振動制御、姿勢変更時の柔軟構造の残留振動の制振制御などが検討されているが、このような高精度構造システムの信頼性を担保するためには、構造・制御システムの保全状態を軌道上で把握し、高信頼度を達成するための高度の診断技術が必要である。本研究では、スマート構造・適応構造の特性を生かして振動データを監視する自己診断システムの提案とタグチメソッドを用いた異常診断法についての研究を行う。本研究では、数値シミュレーションおよびモデル実験により、MTシステムによる異常診断法の有効性を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、柔軟宇宙構造の微小な振動応答をタグチメソッドを用いて解析し、システムの異常を診断する技術を開発する。宇宙構造の高精度形状制御、振動制御を目的として、圧電素子などのセンサーおよびアクチュエーターの機能を持つ機能性材料を用いるスマート構造が注目されている。本研究では、スマート構造による振動制御系の信頼性を高めるためにシステムの異常を検知し自己診断する方法について研究する。また、実験室モデルを対象として、数値シミュレーションおよびハードウェア実験を行い、提案する統合設計法の有効性を検証する。これらの研究成果をもとに、システムの異常診断法とスマート構造の振動制御機能を統合し最適化するため、将来の技術開発に向けた有用な知見を得る。

スマート構造の実験室モデルの異常時と正常時のデータを用いて異常診断を行う方法について研究する。診断方法としてはタグチメソッドに着目し、本研究者が従来から研究してきたモデルを用いる観測残差の尤度比検定や非線形カルマンフィルタを用いる診断・推定法と比較する。数値シミュレーションによる検討を行うため、ダイナミックシミュレーションのソフトウェア(ANSYS)を導入して、構造の微小な損傷を模擬することにより、生成された応答データを解析することにより、MTシステムを用いた診断法の性能を評価する。ANSYSの非定常非線形解析機能を用いてシミュレーションを行うことにより、より複雑な構造の損傷モデルを用いた異常診断を行うことができる。これにより、タグチメソッドを用いた異常診断法の診断精度についても検証する。

4. 研究成果

- (1) 異常時と正常時のデータを用いて異常診断を行うタグチメソッドに着目し、尤度比検定やカルマンフィルタを用いるモデルベースの診断・推定法と比較した。簡単な構造の数値モデルを用いて異常を模擬することにより数値シミュレーションによる検討を行い、タグチメソッドがモデルベース法と同様に有効であることを示した。

対象モデルは今後の実験的検証を想定して片持ちなり（材料 クロムモリブデン鋼，長さ 0.26m，幅 0.03m，厚さ 0.001m）とした。このモデルを使用して MATLAB を用いた数値シミュレーションを行った。MT システムによる異常診断の結果を図 1 に示す。時間が経つほど MD の値が大きくなる頻度が上がっているため、異常と判定することができる。モデルベースの異常診断結果を図 2 に示す。カルマンフィルタを用いた残差の波形を使い、尤度比検定を行い異常と判定した。タグチメソッドによる異常診断は、モデル誤差に対してロバスト性があり、目視で判断しにくい異常の検出、複数の要因がある場合にも有効である。

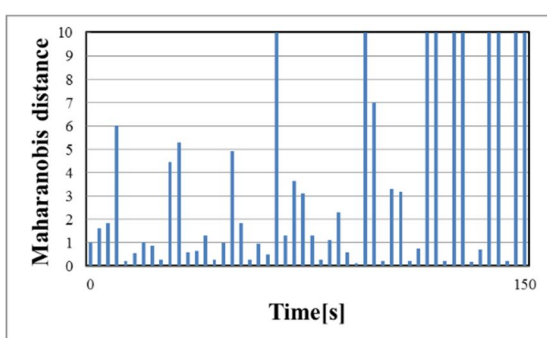


Figure 1. MT system fault detection result.

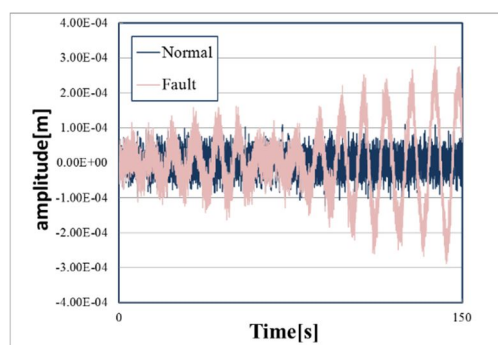


Figure 2. Model-base fault detection result.

- (2) 運用時の振動データをもとに異常診断を行うタグチメソッドを用いた異常診断実験を実施した。スマート構造モデル(片持ちはりに制御用と計測用の圧電素子を貼付した実験モデル)に直径 1 mmの微小な欠損を与えて異常を模擬することにより、実験室モデルを用いた実証実験を実施した。図 3 に示すように、片持ちはりに圧電素子を装着したスマート構造モデルを用いた実証試験を行った。センサーにレーザー変位計を使用して得られたランダム振動応答波形を用いて異常診断を行った。レーザー変位計を用いて計測した変位応答を標本線とともに図 4 に示す。これらの応答特性から異常を診断することは非常に困難である。この場合の MT システムによる正常時および異常時の診断結果を図 5(a) および図 5(b)に示す。図 5(b)では、マハラノビス距離が閾値 4 を超えており異常と判定できることが実験でも示された。

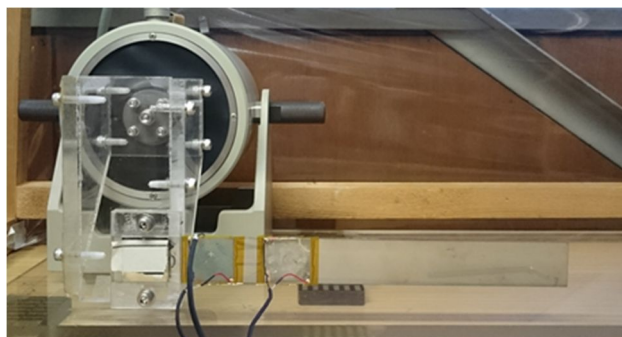


Figure 3. Experimental setup of the smart beam.

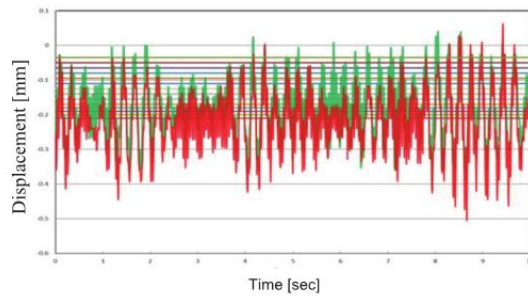


Figure 4. Displacement response and sampling lines: normal (green)/failure (red).

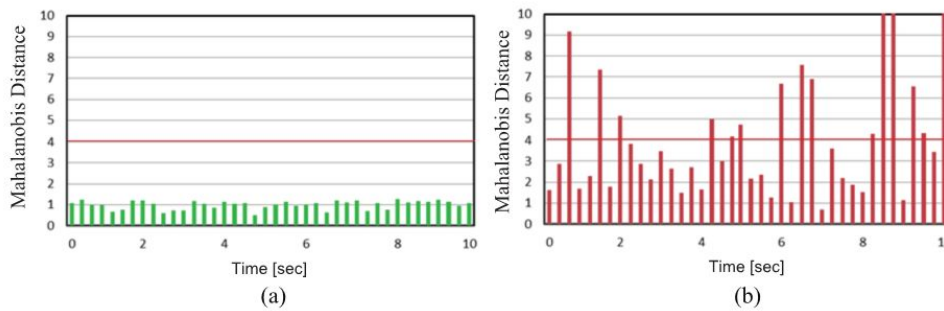


Figure 5. MDs for each time segment data: (a) normal mode and (b) failure mode.

- (3) ANSYS を用いた数値シミュレーションを実施して、タグチメソッドを用いた異常診断の基本的な有効性を示した。図 6 にスマートはりの有限要素モデル、図 7 にその振動モードを示す。ランダム振動応答波形を用いて異常診断を行った結果、図 8(a), (b) に示すように実験結果と同様に MT システムによる異常診断の有効性が示された。なお、シミュレーションでは損傷の大きさを变化させて異常診断の精度についても検討した。

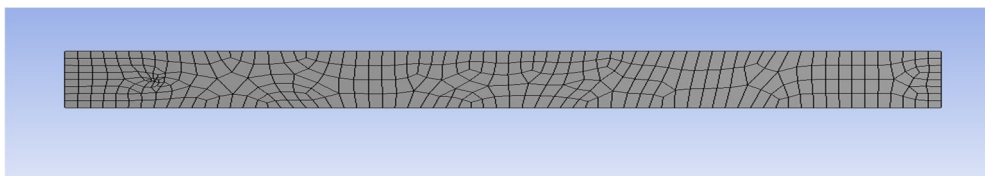


Figure 6. Abnormality simulated by an artificial hole (ANSYS model).

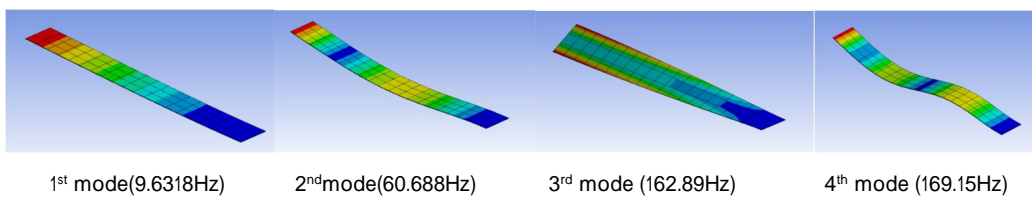


Figure 7. Mode shapes and eigen-frequencies of the beam.

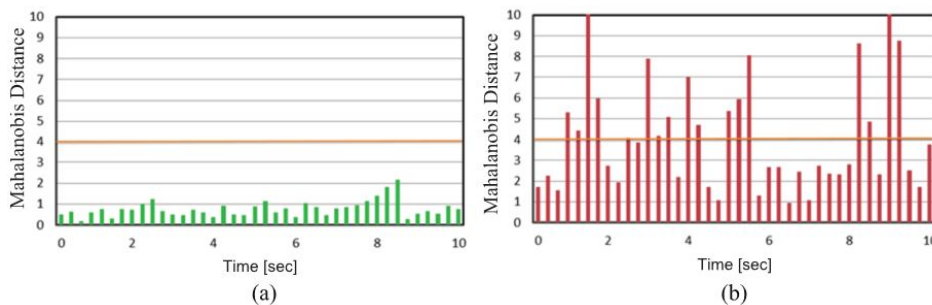


Figure 8. MDs for each time segment data: (a) normal mode and (b) failure mode.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hiroshi Okubo, Toui Ushiku and Marika Satoh	4. 巻 31
2. 論文標題 Slew maneuver control of flexible spacecraft for vibration suppression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/1045389X20914966	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 該当する

1. 著者名 Hiroshi Okubo	4. 巻 184
2. 論文標題 Slew maneuver control of flexible spacecraft for vibration suppression	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/184/1/012001	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 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Okubo, H., Ushiku, T., Satoh, M.
2. 発表標題 Fault Diagnosis of Adaptive Structures Using Mahalanobis-Taguchi System
3. 学会等名 30th International Conference on Adaptive Structures and Technologies（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保博志, 牛久斗偉, 佐藤茉莉香
2. 発表標題 タグチメソッドを用いたスマート構造の異常診断
3. 学会等名 日本機械学会D&D講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保博志, 牛久斗偉, 佐藤茉莉香
2. 発表標題 タグチメソッドを用いた適応宇宙構造物の異常診断
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牛久斗偉, 大久保博志
2. 発表標題 タグチメソッドを用いた適応宇宙構造物の異常診断
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉嶺磨波, 大久保博志
2. 発表標題 柔軟構造の振動応答を抑制する入力成形法について
3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Touji Ushiku and Hiroshi Okubo
2. 発表標題 Application of Taguchi Method for Fault Detection of Adaptive Structures
3. 学会等名 29th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 牛久 斗偉, 村野 亨, 吉嶺磨波, 大久保 博志
2. 発表標題 適応宇宙構造物の異常診断に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第56回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 牛久 斗偉, 吉嶺磨波, 大久保 博志
2. 発表標題 タグチメソッドを用いた適応宇宙構造物の異常診断
3. 学会等名 第 26 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス[SEC'17]
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Okubo, Manami Yoshimine
2. 発表標題 Integrated Input Shaping for Vibration Control of Flexible Structures
3. 学会等名 28th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 牛久斗偉, 村野 亨, 吉嶺磨波, 大久保博志
2. 発表標題 適応宇宙構造物の異常診断に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第55 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H.Okubo
2. 発表標題 Slew maneuver control of flexible spacecraft for vibration suppression
3. 学会等名 International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering (国際学会)
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----