

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01290

研究課題名(和文) 高信頼性・安全性システムのためのオンライン状態監視に基づく動的な保全計画

研究課題名(英文) Dynamic maintenance plan for systems with online condition monitoring

研究代表者

金路(Jin, Lu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：00436734

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)：この研究課題は、逐次的に得られる監視情報が活用できるシステムの状態監視保全における、保全行動とその実施時期を最適に定める方策の確立を目的とした。そのために様々な要因を受けて変化するシステムの劣化の確率的なモデル化に基づいて、状態監視保全の最適方策を求めるために必要な数理モデルを構築した。そして、外的な要因が変化する状況下のシステムの状態監視保全の方策を最適化し、最適保全方策の性質の数理的な解析と数値的な確認を行った。この成果は、状況の変化にリアルタイムで応じるための動的な保全方策の提案を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

保全計画の策定には、対象システムに関する情報に基づいて、そのシステムに実施する保全行動を選択する基準としての保全方策を定める必要がある。これまでの研究のほとんどは保全方策を数値的に導くのみで、得られた解の最適性を検討していない。本研究では最適保全方策の数理的な性質を究明しているため、導いた方策の最適性を保証できる。また、本研究で解明した最適保全方策の性質は、考えうる方策の候補数を有限の方策数に限定できる。この成果が保全計画の策定速度の加速の一助になると考える。

研究成果の概要(英文)：This research aims to propose an optimal dynamic maintenance policy based on online monitoring information related to system deterioration and other factors that may affect the system deterioration. Firstly, this research formulated the system deterioration affected by various factors using a stochastic process and constructed a decision-making model to optimize the condition-based maintenance policy. Using the proposed model, an optimal maintenance action that minimizes the total maintenance and operation cost can be determined in a short time. Furthermore, this research investigated the structural properties of optimal maintenance policies and obtained some sufficient conditions to establish a threshold-type policy. These results are helpful for dynamically determining an optimal maintenance policy.

研究分野：信頼性工学

キーワード：保全計画 最適化 意思決定 マルコフ決定過程 確率過程 状態監視保全

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの状態監視保全の研究では、システムの劣化のみを監視し、劣化以外の監視情報(稼働条件などシステムを取り巻く状況)が一定との仮定の下で、保全計画の性質を検討してきた。その条件は画一的な計画の決定と運用が最適となるための条件であり、システムの劣化状態に合わせた最適な保全行動も可能となる。しかし、近年の通信技術の発達と普及によって到来したIoT時代と相まって、多くの監視情報の変化をオンラインで獲得できるようになってきている。この時代に相応しい保全方策は、監視情報の変化も考慮に入れたものであるべきだが、その場合の最適な保全方策の性質の検討は、従来のモデルでは対応しきれず、より適切かつ柔軟な保全計画が必要である。本研究で提案する動的な保全計画は、逐次的に取得できるオンライン監視情報を活用し、状況の変化に合わせて、リアルタイムにシステムへの保全方策を更新することを狙いとしている。この提案はこれまでのモデルよりもIoT時代の需要に合致し、実用性の高い学術研究として大きな意味を持つと考え、この課題を始めた。

2. 研究の目的

IoT時代と相まって、オンライン監視下に置かれるシステムの数は増大の一途を辿っている。そして監視技術の発展により、劣化状態のみならず、稼働条件などシステムを取り巻く状況に関する情報の連続監視も可能となった。従来の状態監視保全の研究成果を、新たに逐次的に得られるようになったオンライン監視情報も活用するように発展させて、状況の変化にリアルタイムで応じる、動的な保全計画を提案することが本研究の目的である。本研究の成果によって保全効率を現行の保全計画では達成できない水準に引き上げることを通じて、今後益々増大が危惧されている社会全体のインフラなど大規模システムの保全費用の削減、そして高信頼性・安全性の維持の双方を両立させた社会の実現を目指したい。

3. 研究の方法

以下のステップで研究を進めてきた。

- 1) 確率過程を用いシステムの劣化を表した上で、オンライン監視情報を活用した状態監視保全のための理論モデルを構築する。
- 2) 保全の対象システムの劣化に加えて、副次的な保全機会、ランダムに到着するショックによるダメージ、監視装置の精度の低下、連続な劣化過程、他の保全方式との併用など、監視情報の変化と新たな保全方式を想定し、それぞれが変化していく状況に合わせて最適な保全方策の更新による動的な保全計画を提案する。
- 3) 最適保全方策の性質を解析的に究明し、シミュレーションによる性質のデモンストレーションとともに、提案した保全計画の保全効率の評価を行う。

4. 研究成果

(1) 副次的な保全機会を活かした状態監視保全

機会保全(図1)はひとつのユニットの保全を行う際に、別のユニットの保全も同時に行うことを検討する保全行動であり、一部の保全実施にも全体の稼働停止を要するシステムの保全費用の削減を可能とする。

外部からの保全の機会を活用して、対象のシステムと同時に保全を行う保全方法
保全段取りコストやダウンタイムコストを削減できるというメリットがある

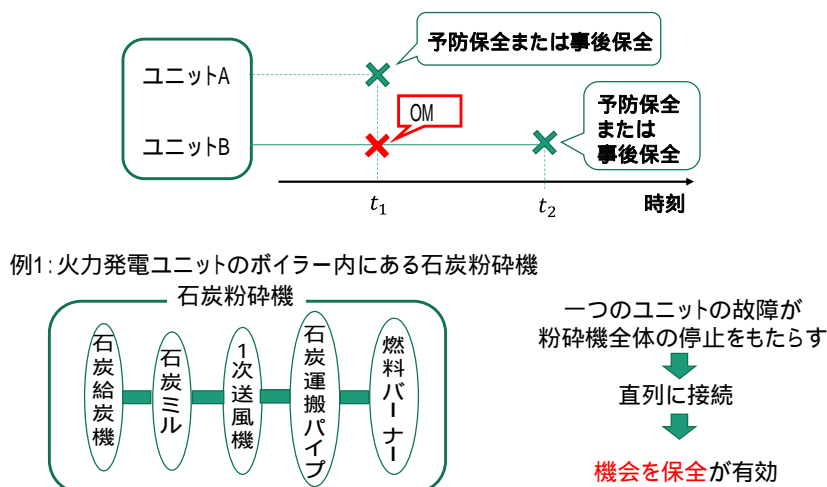


図1 機会保全

(2) ランダムに到着するショックによるダメージの累積量を考慮した状態監視保全

これまで累積回数のみを考慮していたショックのシステム劣化への影響を、ショックによるダメージの累積量に基づく劣化モデル(図2)へと拡張した。大きさの異なるショックはシステムへのダメージは同じということは理論的に取り扱いやすいが、現実の問題に適用するには限定的であった。累積ダメージ量を意思決定の情報に加えて、保全の意思決定モデルに取り入れた場合について、無期限に亘る総期待割引コストが最小となるような最適方針が閾値型となることを証明し、またショックの影響の有無による閾値の大小関係に関する性質を得た。

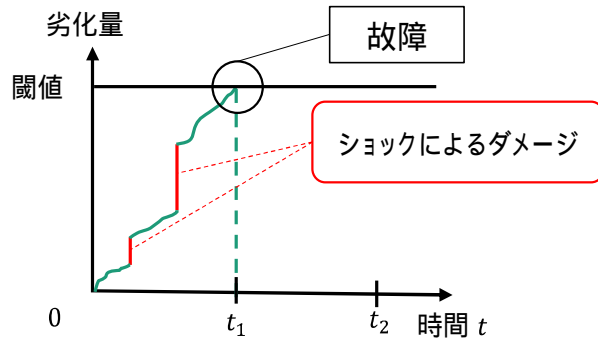


図2. 劣化とショックによるダメージ

(3) 監視装置の精度の低下を考慮した状態監視保全

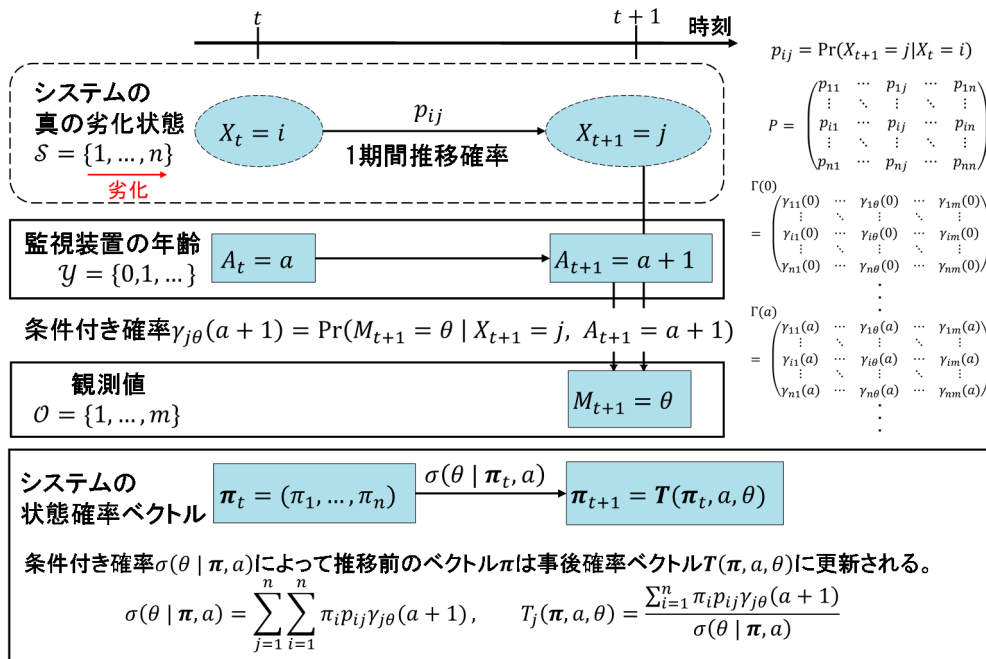


図3 精度低下を考慮する状態監視保全モデル

劣化するシステムの状態監視が部分的な状況において、監視装置の精度もまた劣化する場合(図3) 総期待割引コストを最小にする保全方針が、システムの状態確率ベクトルと監視装置の年齢に関して、閾値を持つことを明らかにした。その究明に、離散時間マルコフ決定過程を援用した。この研究は監視装置の劣化を考慮しているところに新規性がある。

(4) 連続の劣化モデルの下での状態監視保全

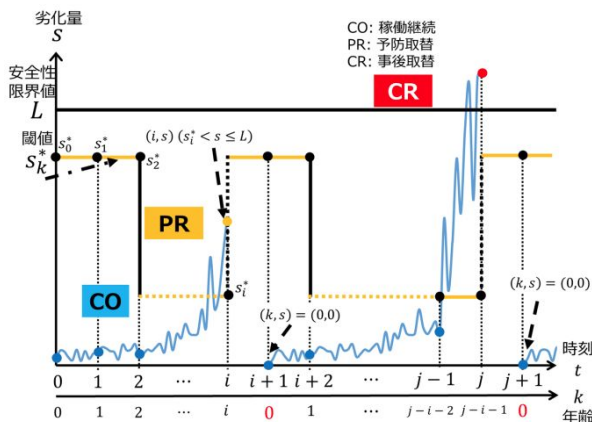


図4: 予防取替の単調方針の関係

本研究では、システムの劣化過程が幾何ブラウン運動に従う場合の、状態監視保全の最適方針の性質を解析的に明らかにした。幾何ブラウン運動は劣化速度が時間の経過につれて急激に増加し、劣化量の測定値に非単調性がある。このシステムに対する保全行動を事後取替と予防取替の2種類があるとき、システムの劣化量と年齢に基づいた取り替え時点を総期待割引コストの最小にするように定める最適方針は閾値を持つような単調方針となることを示した(図4)。

(5) 他の保全方式の活用

上記の状態監視保全以外に、他の保全方式を活用した保全計画も検討した。主な研究成果は下記の2点の提案である。

動的な定期点検計画の提案

法令や社内基準に基づいた定期点検(図5(a))に加えて、安価で高頻度の実施が可能な不完全点検(図5(b))を併用することで、点検の費用、安全性喪失による損失、不完全点検の検出確率を考慮した総期待費用を最小にする点検計画を提案した。寿命分布に故障率増加型のワイブル分布を仮定したが、他の分布にも適用できる。また最適な点検計画を持つ構造的性質の検討と、得られた点検計画が先行研究よりも優れていることを確認した。

完全点検:

- ✓ システムの状態を**直接的に把握**しうる
精度の高い重度な点検
(分解, 目視, 触診など)
- ✓ **多くの費用**が必要
- ✓ 法令や社内基準等で**一定間隔実施**

不完全点検(状態監視):

- ✓ システムの状態を**部分的に把握**する
完全点検ほどの精度をもたない軽度な点検
(稼働データ, 成分, 動画など)
- ✓ 完全点検より**費用が安い**
- ✓ 保全意思決定者によって**点検頻度を柔軟に変更可能**な点検(解析時点, 監視時点など)

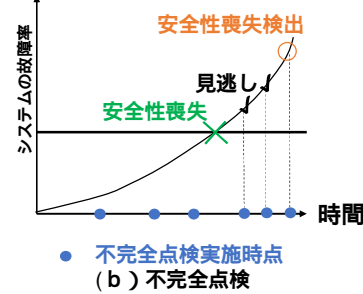
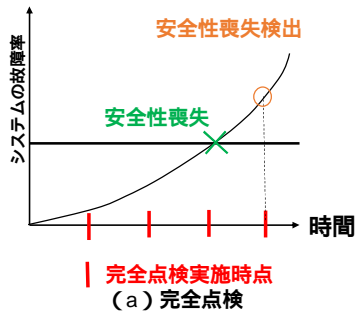


図5 完全点検と不完全点検

動的なオンコンディション保全の提案

一定の時間間隔で実施する点検によってシステムの状態を観測し、保全の必要性を検討するのが通常のオンコンディション保全である。それに対して本研究では、年齢と、点検の結果得られるシステムの劣化の進行に応じて、点検間隔を狭めていく計画を立案した。この計画が、従来のオンコンディション保全よりも総期待費用を小さくすることを示し、点検間隔と劣化状態の関係も解析的に明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Jin, L. and Yamamoto, W.	4. 巻 24
2. 論文標題 Optimal Inspection Policy for Scheduled Maintenance of Aging Systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice	6. 最初と最後の頁 99-111
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 Jin, L. and Yamamoto, W.	4. 巻 174
2. 論文標題 Adaptive Age Replacement Using On-Line Monitoring	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Procedia Engineering	6. 最初と最後の頁 117-125
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.proeng.2017.01.177	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 Jin, L.	4. 巻 117(90)
2. 論文標題 Scheduling imperfect inspections in preventive maintenance of systems with increasing failure rates（故障率増加システムの予防保全における不完全点検の併用に関する研究）	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 19-24
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 金 路	4. 巻 39
2. 論文標題 劣化システムの保全計画	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本信頼性学会誌「信頼性」	6. 最初と最後の頁 139-147
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 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Yoshida, R, and Jin, L.
2. 発表標題 Optimal replacement policy for a deteriorating system subjected to geometric Brownian motion
3. 学会等名 the 18th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Genda, S. and Jin, L.
2. 発表標題 Threshold policy of condition-based maintenance for a multi-state system and deteriorating sensor
3. 学会等名 the 18th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Marko Dimitrov, Lu Jin and Ying Ni
2. 発表標題 Properties of American-type Options under a Markovian Regime-Switching Model
3. 学会等名 International Virtual Conference and Demographics2020 Workshop (SMTDA2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jin, L. and Matoba, S.
2. 発表標題 Threshold Type Maintenance Policies for Systems Under Cumulative Damage From Random Shocks
3. 学会等名 The 9th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Odajima, Y. and Jin, L.
2 . 発表標題 Optimization for Opportunistic Maintenance with Semi-Markov Decision Process
3 . 学会等名 the 17th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Matoba, S. and Jin, L.
2 . 発表標題 Structured maintenance policy for deteriorating systems under cumulative shocks
3 . 学会等名 the International Conference on Stochastic Processes and Algebraic Structures - From Theory Towards Applications, (SPAS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Jin, L. and Ni, Y.
2 . 発表標題 Valuation and Optimal Strategies for American Option Under a Markovian Regime Switching Model
3 . 学会等名 the International Conference on Stochastic Processes and Algebraic Structures - From Theory Towards Applications, (SPAS2020) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Jin, L.
2 . 発表標題 Optimal Maintenance Policy Including Inspections and Condition Monitoring with Multiple Sensors
3 . 学会等名 the 11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Odajima, Y. and Jin, L.
2. 発表標題 Opportunistic Maintenance Policy for Multi-unit System under Markovian Environment Changes
3. 学会等名 The 5th International Conference on the Interface between Statistics and Engineering (ICISE 2019) on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2018) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin, L., Ni, Y. and Sakurai, Y.
2. 発表標題 American Option Pricing under Markovian Regime Switching Model
3. 学会等名 the 18th Conference of the Applied Stochastic Models and Data Analysis International Society (ASMDA 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田嶋優、金路
2. 発表標題 変化する環境要因を考慮したマルチユニットシステムの機会保全に関する研究
3. 学会等名 日本品質管理学会第49回研究発表会, 研究発表要旨集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 的場翔馬、金路
2. 発表標題 累積ショック量を考慮した劣化システムの予防保全
3. 学会等名 日本品質管理学会第49回研究発表会, 研究発表要旨集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jin, L. and Yamamoto
2. 発表標題 Integrated Inspection Policies for Systems with Increasing Failure Rates
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jin, L.
2. 発表標題 An Integrated Policy on Operation and Maintenance for Load Sharing Systems with Deterioration
3. 学会等名 the 16th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jin, L.
2. 発表標題 Dynamic Decision-making Process for Deteriorating Systems Operating in a Variable Environment
3. 学会等名 Workshop on Model and application of reliability and maintainability
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金路
2. 発表標題 工学部教育におけるシステム信頼性実験の設計
3. 学会等名 日本品質管理学会第48回研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金路
2. 発表標題 精度の異なるモニタを用いる状態監視保全に関する研究
3. 学会等名 第9回横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 金路, 山本渉
2. 発表標題 故障率増加型システムにおける複合的な点検計画に関する研究
3. 学会等名 第48 回信頼性・安全性シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jin, L.
2. 発表標題 Optimal Maintenance Policy for Deteriorating Systems Under a Variable Environment
3. 学会等名 Academy of Mathematics and Systems Science, Malardalen University, Sweden (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 雪本 泰久, 金 路
2. 発表標題 モニタリングを活用した点検計画と保全方策の最適化について
3. 学会等名 日本品質管理学会第47回研究発表会, 研究発表要旨集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金 路
2. 発表標題 マルコフ決定過程に基づくマルチユニットシステムの最適保全方策 (Maintenance Optimization for Multiple-unit Systems Based on Markov Decision Process)
3. 学会等名 待ち行列シンポジウム予稿集 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山 尚晃, 金 路
2. 発表標題 オンコンディション保全のための不完全点検の併用に関する研究
3. 学会等名 日本品質管理学会第113回研究発表会, 研究発表要旨集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 雪本 泰久, 金 路
2. 発表標題 2コンポーネント負荷配分システムにおける最適保全方策
3. 学会等名 第47回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jin, L., Uwano, T., and Suzuki K.
2. 発表標題 Operation and Maintenance Policy with Flexible Load Sharing
3. 学会等名 The 10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR 2017), Grenoble, France (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jin, L. and Koyama, N.
2. 発表標題 Improving scheduled maintenance with imperfect inspections
3. 学会等名 The 15th Asian Network for Quality Congress (ANQ 2017), Kathmandu, Nepal (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yamamoto, W. and Jin, L.	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 327-339
3. 書名 Frontiers in Statistical Quality Control Vol. 12 (Approximate Log-Linear Cumulative Exposure Time Scale Model by Joint Moment Generating Function of Covariates)	

〔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
---------	---------