

機関番号：12612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007年～2010年

課題番号：19710125

研究課題名（和文）状態監視保全における最適保全方策とその応用

研究課題名（英文）Optimal Procedure for Condition Monitoring Maintenance

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・助教

研究者番号：00436734

研究成果の概要（和文）：

本研究は状態監視保全における最適保全方策が Monotone Procedure によって与えられる為の条件を検討した。対象システムの状態遷移確率行列 P の条件を既存研究の TP_2 (Totally Positive of order 2) 順序より SI (Stochastically Increasing) 順序に緩め、この順序の下で Monotone Procedure が最適となる為の条件の究明について世界中の多くの研究者が長年に亘って挑戦してきたが、今日まで未解決である。本研究は P が SI 順序の性質を持つ場合、システムの状態と観測値を関連付ける条件付確率行列 Γ が単位行列であることが、最適保全方策が Monotone Procedure により与えられる為の必要十分条件であり、この条件をこれ以上緩めることは出来ないことを証明した。これにより約半世紀に亘って検討されてきたテーマに終止符を打つことができた。

また、Monotone Procedure 以外に、現実の状態監視保全でよく使われている k -out-of- n 方策の最適性も検討し、最適保全方策が k -out-of- n 方策に限られる為の必要十分条件を示した。これにより検討すべき保全方策が少数に限定され、最適アクションを容易に求めることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

This research investigated an optimal maintenance problem with incomplete observations and showed that, when the transition probability matrix (P) has the stochastic increasing (SI) property, the optimal procedure is given by a monotone procedure if and only if the conditional probability matrix (Γ) is given by an identity matrix. This research brings to a close over 50 years of research on ways to extend the optimality of monotone procedure on the basis of SI ordering of the state probability vectors.

Furthermore, this research studied the optimal structure identification problem for a monitoring system with multiple sensors and identified a necessary and sufficient condition under which a k -out-of- n structure is optimal in terms of minimizing the expected risk. This means that, fewer structures need to be considered when searching for the optimal one.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,700,000	540,000	3,240,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 / 社会システム工学・安全システム

キーワード：状態監視保全、安全性、信頼性、保全性

1. 研究開始当初の背景

近年の科学技術の進歩に伴い、システムが巨大化・複雑化している今日、事故や故障による社会的損害は計り知れない。故障を防ぐにはシステムの構成要素である部品一つ一つの耐久性を向上させるとともに、そのシステムの運用段階においてナノセンサー、IC タグなどのような監視装置（以下モニターと呼ぶ）を用いた予兆情報などにより故障を事前に抑える状態監視保全が重要となる。

状態監視保全は信頼性向上に重要な役割を果たすが、種々のノイズや環境条件の違いなどにより、“システムの正常時に警報を発する誤報”と“異常時に警報を発しない欠報”が存在する。このため、必ずしもモニターは対象システムの内部状態を正確に伝えるとは限らない。そこで、誤報や欠報を考慮したうえでモニター情報に基づき最適なアクションを施すことが大切となる。本研究は状態監視保全を着目し、誤報や欠報を考慮したうえで最適保全方策について検討した。

2. 研究の目的

本研究はモニターを用いて対象システムの内部の状態を間接的に観測する状態監視保全を着目し、最適保全方策の検討を大きな目的とした。

本研究はまず、状態監視保全において部分的に観測可能なマルコフ過程モデル（以下、POMDP モデル）を仮定した場合に、最適保全方策が Monotone Procedure（単調方策とも）に限られる為の条件の理論検討を一つの目標とする。ここで Monotone Procedure とは異なる二つのアクションはモニター値のある一つの値を境（閾値）にしてのみ表れ、2 つ以上の閾値は存在しない方策をいう。これにより、例えば、モニター値が 10 通り、アクション数が 2 通りの場合、考えうる全方策 $2^{10}=1024$ 通りの中から、最適方策は 11 通りのみに絞ることができる。モニター値が 20 通りの場合は $2^{20}\approx 10^6$ 通りの中から、21 通りに絞るこ

とができる。このように本論文により最適方策が少数のもののみで限定できるため、瞬時の意思決定を下すことが可能となる。

また、Monotone Procedure 以外に、現実の状態監視保全でよく使われている k -out-of- n 方策の最適性も検討し、最適保全方策は、 k -out-of- n 方策の中に限定しうするための条件について考察し、取り得る保全方策の数がさらに限定されることを 2 番目の目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、対象システムがマルコフ劣化し、その内部状態が直接把握できず、モニターの観測値に基づき、真の状態を推測する部分的に観測可能なマルコフ決定過程（POMDP）を用い、状態監視システムをモデル化した。監視対象とするシステムの真の状態を X で表し、 X は $\{1, 2, \dots, n\}$ のいずれかの状態をとるものとする。1 は正常、 n は完全に故障、その他はその中間の状態で劣化が進んでいることを表す。 X の状態を直接知ることは出来ず、モニター値 $M \in \{1, 2, \dots, m\}$ により推測する。 X と M を結びつけるものとして、条件付き確率行列 Γ を考える。システムの状態遷移確率行列 P にて表される。このような Γ と P によるモデル化は POMDP と呼ばれる。状態遷移 P を考慮する場合には、過去の状態遷移、モニター値および保全の履歴が、システム運用開始から当該時点での事後確率に相当する状態確率ベクトル $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)$ に全て縮約される。これらの情報に基づき、期待リスクを算出し、最適な保全方策を下す。

POMDP モデルにおいて、状態監視保全の最適な保全方策が Monotone Procedure の中に限定される為の条件は 40 年以上にわたり、数多くの研究者により検討が為されてきた。本研究は、POMDP モデルをより広い範囲に適用する為、 P の条件を従来の TP2 の順序より SI の順序に緩め、その条件下で Monotone Procedure が最適となる為の条件を検討した。

4. 研究成果

本研究は状態監視保全における最適保全方策が Monotone Procedure によって与えられる為の条件を検討し、以下の成果を得られた。

- ① モニターの数を1台のみではなく一般の n 台とし、これらのモニターが独立の場合、Monotone Procedure が最適となる為の十分条件を示した。
- ② 上記において、 n 台のモニターが独立でない場合の最適保全方策を考察し、Monotone Procedure が最適となる為の十分条件を示した。
- ③ 状態推移確率行列 \mathbf{P} が SI (Stochastic Increasing) の性質を持つ場合、システムの状態と観測値を関連付ける条件付き確率行列 $\mathbf{\Gamma}$ が単位行列であることは、最適保全方策が Monotone Procedure により与えられる為の必要十分条件であることが証明でき、この条件をこれ以上緩めることは出来ないことが判明した。これにより約半世紀に亘って検討されてきたテーマに対する理論的な最終結論を与えた。

本研究は、さらに、Monotone Procedure 以外に、現実の状態監視保全でよく使われている k -out-of- n 方策の最適性を検討し、最適保全方策が k -out-of- n 方策により与えられる為の必要十分条件を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- 1) Jin, L. and Suzuki, K. (2011): Necessary and Sufficient Condition for Control Limit Policy on Partially Observable Markov Decision Process, Journal of the Japanese Society for Quality Control, Vol. 42, pp. 238-249. (査読あり)
- 2) Jin, L. and Suzuki, K. (2011): Necessary and Sufficient Condition for Optimal k -out-of- n Structure of Monitoring System with n General Sensors, Journal of Reliability Engineering Association of Japan, Vol. 32, pp. 89-95. (査読あり)

- 3) Yamamoto, W., Jin, L. and Suzuki, K. (2009): Optimal Allocations of Load-sharing k -out-of- n : F System, Journal of Statistical Planning and Inference, Vol. 139, pp. 1777-1781. (査読あり)
- 4) Jin, L., Horikoshi, Y. and Suzuki, K. (2009): Optimality of k -out-of- n Systems for Condition Monitoring Maintenance Using Dependent Information, Quality Technology and Quantitative Management, Vol. 6, pp. 23-32. (査読あり)

[学会発表] (計7件)

国際会議

- 1) Jin, L. and Suzuki K. (2009): Necessary and Sufficient Condition for Control Limit Policy in Partially Observable Markov Decision Process with Stochastic Increasing, Proceedings of the 7th Asian Network for Quality Congress, pp. 727-736, Tokyo, Japan. (2009年9月17日、日本・東京)
- 2) Jin, L., Kumagai K. and Suzuki K. (2007): Control Limit Policy for Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) Based on Stochastic Increasing, Proceedings of ICRMS2007: International Conference on Reliability Maintain- ability and Safety, Beijing, pp. 87-92, China. (2007年8月22日、中国・北京)
- 3) Jin, L., Endo, M., Tanaka, K. and Suzuki, K. (2007): Optimal Design for a Monitoring System Comprising n Dependent and Non- identical Sensors, Mathematical Methods in Reliability: Methodology and Practice, Glasgow, pp. 1-12, U. K.. (2007年7月2日、イギリス・グラスゴー)

国内発表

- 1) 堀越雄太, Jin, L., 鈴木和幸 (2008): “ k -out-of- n 型監視方策の最適性,” 日本信頼性学会第20回秋季信頼性シンポジウム, pp. 91-94. (2008年4月18日、財

団法人日本科学技術連盟・千駄ヶ谷本部ビル)

- 2) 堀越雄太, 遠藤将則, Jin, L., 鈴木和幸 (2007): “独立でないモニターを用いた k-out-of-n システムの最適性,” 日本信頼性学会第 15 回春季信頼性シンポジウム, pp. 33-36. (2007 年 6 月 1 日、財団法人日本科学技術連盟・千駄ヶ谷本部ビル)
- 3) Kumagai, K. Jin, L., Suzuki, K. (2007): “Sufficient Conditions for Optimal Control Limit Policy with Respect to Stochastic Increasing Ordering,” 日本品質管理学会第 83 回研究発表会, 研究発表要旨集, pp. 111-114. (2007 年 5 月 26 日、財団法人日本科学技術連盟・東高円寺ビル)
- 4) 遠藤将則, Jin, L., 鈴木和幸 (2007): “独立でないモニターを用いた k-out-of-n 論理構成の最適性,” 情報システム学研究科シンポジウム 第 11 回「信頼性とシステム安全学」予稿集, pp. 25-33. (2007 年 2 月 27 日、電気通信大学・IS 研究棟)

[その他] (計 2 件)

本研究課題に関し、下記の賞を受賞した。

- 1) 2009 年 9 月
第 7 回アジア品質管理シンポジウム
国際会議 (7th ANQ Congress Tokyo)
2009 年度 The Best Paper Award
- 2) 2008 年 5 月
日本信頼性学会 2007 年度若手奨励賞

6. 研究組織

(1) 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・
助教
研究者番号 : 00436734