

# 保全行動提案のための部品の状態予測 - 劣化関係の検索と利用 -

## Prediction of states of parts to propose maintenance action

### - Search and use of deterioration relationship -

精密工学専攻 23号 齋藤大樹  
Hiroki Saitoh

## 1. 序論

近年、地球上のエネルギー資源は枯渇しており、大量生産・大量消費・大量廃棄といった消費型社会から、資源の消費を抑制する循環型社会への移行が急務となっている<sup>(1)</sup>。循環型社会を実現させるためには、3Rと呼ばれる Reuse, Reduce, Recycle を推進させる必要がある。中でも、エネルギーの消費や廃棄物の発生を削減することができる Reuse が重要視されている。効率的な Reuse を行うためには、部品個々のライフサイクルの管理が重要であるため、私たちは、部品の状態を管理し、ユーザの保全行動を支援する部品エージェントシステムの開発を行っている<sup>(2)</sup>。部品エージェントシステムとは、ネットワークエージェントを、実際の部品に追従させることで、部品のライフサイクルの管理を行うシステムである。

部品に対する保全行動は多岐にわたるが、それは部品の劣化状況が使用環境や運転状況など様々な要因により変化するためである。また、劣化の進展は一般に直接観察することが困難である上に、様々な要因との因果関係は確率的である。そのため、ユーザの行動や観測可能な事象を基に、劣化の進展を何らかの方法で推定し、それを基に保全行動を決定する必要がある。

先行研究<sup>(3)</sup>では、部品の劣化の進展を表す因果関係モデルを作成し、それを基に部品の劣化に関する状態予測を行う手法を提案した。

本研究では、その因果関係モデルを作成するために必要となる、劣化に関する情報の検索・利用ができる劣化データベースの導入を目的とする。

## 2. 部品エージェントによるライフサイクル支援

部品エージェントシステムは、実世界の部品と RFID タグによって対応付けられたネットワークエージェントから構成される。部品個々に対応付けられたネットワークエージェントを部品エージェントと呼ぶ。部品エージェントは、各製品・部品の個々に専属するエージェントがその製品・部品の状態、製造情報、使用履歴などの情報を収集し、それをユーザに提示することで製品・部品の保全に関する的確な判断を行えるように支援する。

RFID タグ<sup>(4)</sup>を個々の部品に取り付けることで、その部品が生産工場、修理工場、消費者、販売店などを移動することで、ネットワーク上でも部品エージェントが追従する。そして、RFID タグを介して対応する情報を取得する。部品エージェントは取得した情報を基に、部品の状態予測を行う。そ

して、その時点で対応する部品にとって最も適切な処置をエージェントが考案し、ユーザに提案する。

部品エージェントシステムが状態予測を行い、適した保全行動を提案するためには、部品の近い将来の劣化度合いを把握する必要がある。そこで、現在の部品の状態や劣化に関する知識を基に、劣化の進展具合を予測する手法を提案する。

高田<sup>(5)</sup>は、劣化を引き起こす要因（以下、「劣化要因」と称する）と、それにより発生する劣化現象の基本メカニズム（以下、「劣化メカニズム」と称する）を複数連鎖させることでできる劣化の発生過程を「劣化プロセス」と定義し、劣化現象を定性的に予測した。

長畑<sup>(6)</sup>は、その劣化プロセスに劣化メカニズムの発生確率を導入することで、劣化現象が生起する確率を推定した。長畑<sup>(6)</sup>が提案した部品の状態予測の手順を Fig. 1 に示す。使用環境や運転条件、製品モデルなどの情報を基に作成した劣化プロセスに対して劣化シミュレーションを行い、各事象間に条件付確率を与えることで、因果関係モデルを作成する。そして、作成した因果関係モデルをベイジアンネットワーク<sup>(6)</sup>として扱うことにより、劣化現象の発生確率を求めた。

劣化プロセスを作成するためには、劣化に関する知識を汎用的に整理した「劣化データベース」を用いる（図中赤枠）。しかし、その劣化データベースの構成や、詳細な利用方法は定義されていない。そこで、劣化メカニズムを検索し、劣化予測にも適用できる劣化データベースの構築を行った。

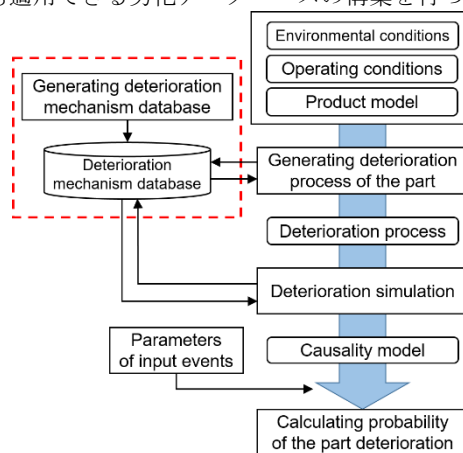


Fig. 1 Procedure for estimation of the part states by part agent

## 3. 劣化関係の検索と利用

前章で述べたように、保全行動を決定するためには、劣化要因と劣化メカニズムが複数連鎖してできた劣化プロセス

の各事象間に条件付確率を与え、因果関係モデルを作成する必要がある。本章では、それらの工程に必要な情報を検索、利用するために用いる劣化データベースについて述べる。

劣化データベースの利用方法を Fig. 2 に示す。劣化データベースには、製品・部品の劣化要因と劣化メカニズムを登録する。登録された各データには、劣化プロセスの構成要素として使用する劣化要因と劣化メカニズムや、劣化事象の生起判定を行う際に使用するパラメータなどを格納する。そして、部品エージェントによる状態予測を行う過程（図中右）で、劣化プロセスの作成や劣化シミュレーションの実行をする際に、劣化データベースから必要な情報を検索し、抜き出して利用することで、一連の状態予測を行うことができる。

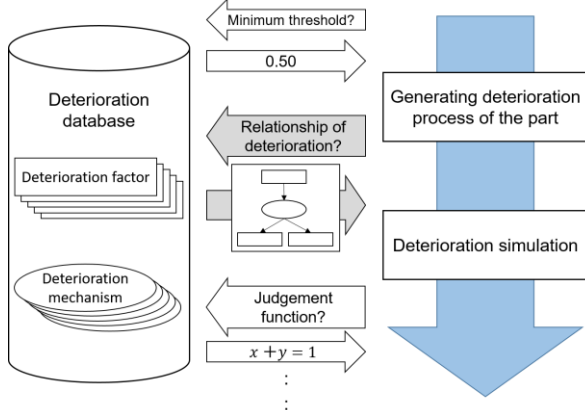


Fig. 2 Use of deterioration database

劣化データベースには、劣化メカニズムと劣化要因の二種類のデータが格納されている。

劣化メカニズムのデータには、以下の情報を格納する。

- 劣化メカニズムの名称
- この劣化メカニズムを引き起こす原因となる劣化要因
- 劣化メカニズムの発生により新たに発生する劣化要因
- 劣化シミュレーションの手段、使用する関数、扱うパラメータの範囲・閾値
- 劣化が発生する場所の分類（アセンブリまたは部品）
- 劣化が発生する製品・部品の名称

劣化要因のデータには、製品を使用する際に発生し得る劣化要因を登録し、以下の情報を格納する。

- 劣化要因の名称
- 生起判定を行うための最低閾値
- パラメータを取得する場所の情報
- 劣化が発生する場所の分類（アセンブリまたは部品）

劣化データベースから情報を検索し、劣化プロセスを作成する全体の流れを Fig. 3 に示す。枠内が実際に劣化データベース中に存在する劣化要因と劣化メカニズムのデータである。アセンブリで発生する入力の情報を部品単位まで細分化して考え、その後、部品に起こる劣化がアセンブリにもたらす影響を考えることで、因果関係を明確にする。

劣化データベースに検索をかける際、対象製品と関係の無い事象も調べてしまうと、検索の効率が悪くなってしまいうため、各データを劣化が発生する場所や、製品・部品の名称で分類することにより、条件を絞り、効率よく検索を行えるよ

う改良した。

また、部品の劣化において、はじめに発生する劣化要因を特定する際、劣化に影響を与えることの無い事象も含んでしまうと、プロセスが膨大な規模になってしまう。そのため、劣化データベース中の各劣化要因にその要因が生起する閾値を設けておき、取得したパラメータと比較することで、はじめに生起する劣化要因を特定した。

劣化シミュレーションを行う際には、劣化データベースから結果を得る手段や使用する関数、パラメータを取得する。シミュレーションの詳細は、4章で述べる。

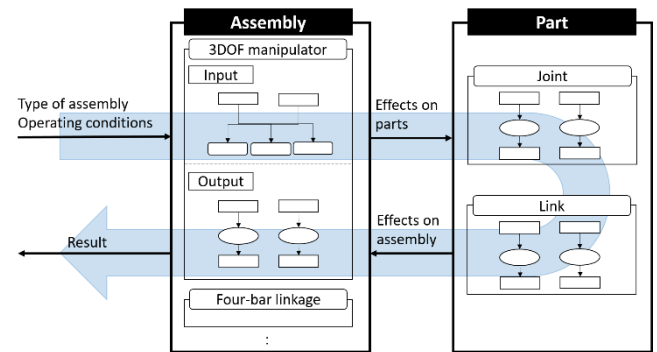


Fig. 3 Flow of information retrieval from deterioration database

#### 4. 因果関係モデルを用いた部品の状態予測

本章では、前章で述べた劣化データベースを用い、劣化プロセスの作成から劣化事象の発生確率を推定するまでの一連の流れについて述べる。

はじめに、環境条件、運転条件、製品モデルなどから初期のパラメータを取得する。この値を劣化データベースに存在する劣化要因が持つ最低閾値と照らし合わせ、条件を満たしている劣化要因を候補として出す。劣化データベースが持つ劣化要因の最低閾値の中には、応力（荷重÷断面積）のように取得したパラメータから更に計算を行う必要があるものも存在するため、その場合には、条件に該当する事象のパラメータを用いて計算した上で、最低閾値と比較する。この事象を事前事象と定義する。

次に、Fig. 4 に示す高田ら<sup>6)</sup>が提案した手法に基づき、劣化プロセスを作成する。劣化データベース上を検索し、その候補の劣化要因によって発生する劣化メカニズムを導き出す。その劣化メカニズムに新たな劣化要因が含まれている場合、その劣化要因を候補に追加した上で、再度劣化データベースから検索を行う。この工程を、新たに劣化要因が発生しなくなるまで続け、特定したものを全て連鎖して繋げることにより、劣化プロセスを作成する。

故障確率を推定するためには、劣化プロセスに条件付確率を与えて因果関係モデルを作成する必要がある<sup>6)</sup>。条件付確率とは、原因となる事象の生起によって変動する結果事象の発生確率であり、劣化シミュレーションを行うことにより算出する。劣化シミュレーションの手順を Fig. 5 に示す。

ユーザの操作条件や環境条件に応じて乱数パラメータを複数生成し、判定関数が劣化シミュレーションシステムのい

いずれかの方法を用いることで条件付確率を算出する。

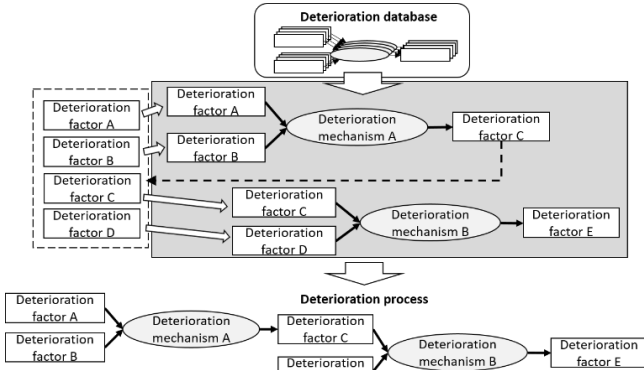


Fig. 4 Generation of deterioration process<sup>(5)</sup>

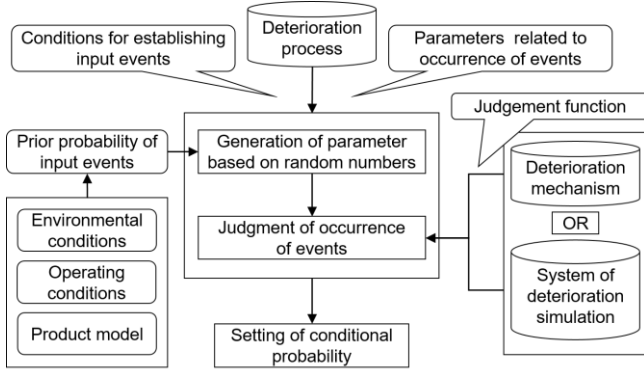


Fig. 5 Procedure of deterioration simulation

判定関数で条件付確率の算出を行う場合には、モンテカルロ法<sup>(7)</sup>を用いる。モンテカルロ法による結果事象の判定方法を Fig. 6 に示す。入力事象の確率分布に従い乱数によって生成されたパラメータを複数回代入し、判定関数の条件と比較することで、結果事象の生起判定を行う。そして、入力事象の組み合わせ別に生起確率を計算することで、条件付確率を算出することができる。

しかし、原因事象と結果事象の関係の中には、結果事象の生起判定を行うための判定関数が無い場合も多く存在する。

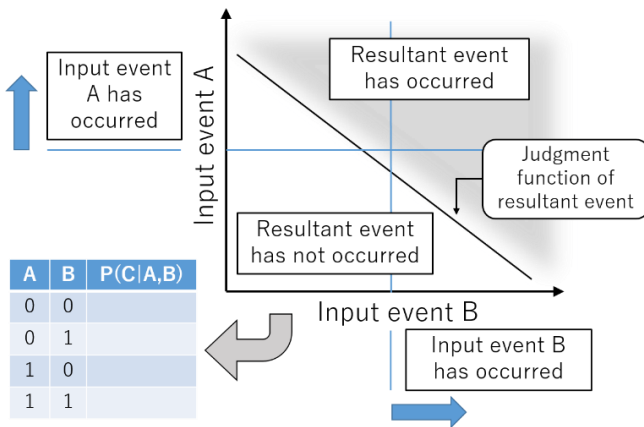


Fig. 6 Calculating conditional probability using judgement function

その場合に、益田ら<sup>(8)</sup>が開発した劣化シミュレーションシステムを用いて条件付確率を算出する。劣化シミュレーションシステムは、形状、質量、材料特性などの情報を持った「製品モデル」を用いて状態の変化を再現できるシステムであり、

これを用いて座標の偏差を比較し、部品の劣化量を測定することができる。条件付確率の算出を行う際には、判定関数の場合と同様に、乱数パラメータを劣化メカニズムに登録されている劣化モデルに与え、挙動のシミュレーションを行う。そして、発生した劣化量が設定した閾値を超えた場合に、結果事象が生起したと判定する。入力事象の発生の組み合わせ別に結果事象の生起確率を計算し、条件付確率を算出する。

## 5. 三自由度マニピュレータを用いたシミュレーション

例として Fig. 7 の三自由度マニピュレータを用い、状態予測を行った。マニピュレータは二つのジョイントと三つのリンクで構成されており、リンク $L_2$ の先端には荷重が取り付けられている。リンク $L_1$ の直線上を $0^\circ$ と定義し、ジョイント $J_2$ を中心にリンク $L_2$ が上下 $90^\circ$ に回転動作を行う。今回は一定の速度でのシミュレーションを想定し、状態予測を行った。

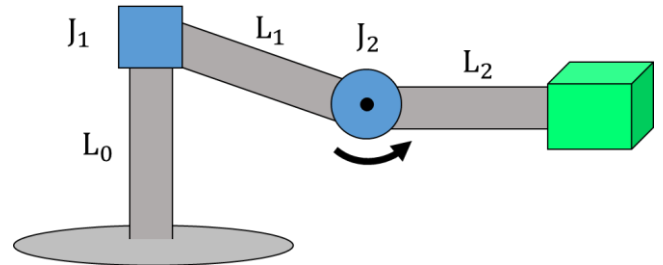


Fig. 7 3DOF manipulator

はじめに、対象製品を「三自由度マニピュレータ」、発生している条件を「マニピュレータの運動」、「手先荷重」と定義し、劣化データベースから条件に該当する劣化事象を検索する。ヒットしたデータにより、三つのリンク、二つのジョイントに負荷が発生することが分かるため、各部品単位の劣化関係の検索へと移行する。ただし、本実験では、リンクの劣化は考慮しない。

最初に発生する劣化要因の特定方法を Fig. 8 に示す。初期値を、予め劣化データベース上に登録されているそれぞれの劣化要因が持つ最低閾値と比較する。そして、その条件を満たした「軸受への荷重」、「総時間」、「1サイクル当たりの時間」を候補の劣化要因とする。

次に、その候補の劣化要因によって生じる劣化メカニズムをデータベース上から探し、該当する劣化関係を抜き出す。「総時間」と「1サイクル当たりの時間」によって発生する劣化メカニズムである「サイクル数」は、事前事象であるため計算を行い、図中の赤線で示すように、その結果の値を劣化要因のパラメータとして更新する。そして、図のようなデータベース上の劣化要因が持つ最低閾値と比較し、候補に加えるかを判断する。

そして、更新された候補の劣化要因が含まれる劣化関係を劣化データベースから検索する。新たな劣化関係を探し出せなくなるまで検索を行い、完成した劣化プロセスを Fig. 9 に示す。図中では、劣化メカニズムとジョイント $J_2$ の劣化プロセスを省略する。本シミュレーションでは、マニピュレータの手先座標のずれが一定値を上回った際に「機能的な故障」

と定義する。また、「動き出し時間の遅れ」のみが、観測可能な事象であるとする。

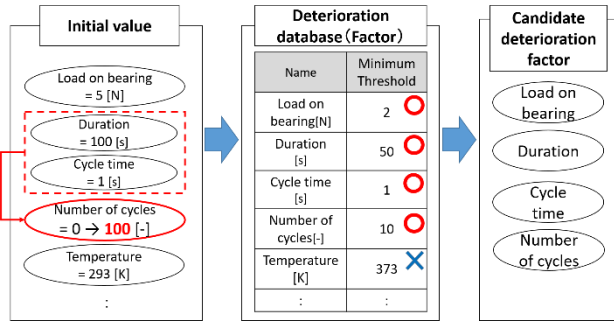


Fig. 8 Comparison of initial value and minimum threshold

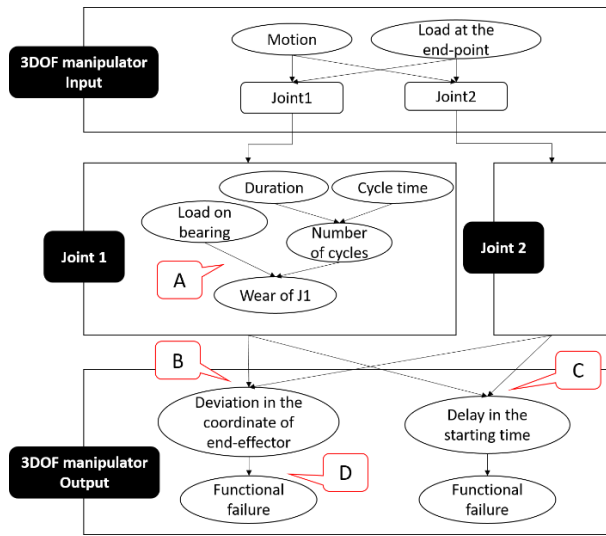


Fig. 9 Deterioration process of the 3DOF manipulator  
後述の「劣化シミュレーション」と「故障確率の推定」は、先行研究<sup>3)</sup>の方法を用いて行う。

図中の劣化関係 A, B では劣化シミュレーションシステムを、劣化関係 C では判定関数を用いた劣化シミュレーションを行い、各事象間の条件付確率を算出する。作成した因果関係モデルを Fig. 10 に示す。劣化関係 D の条件付確率は Fig. 10 のように定義した。

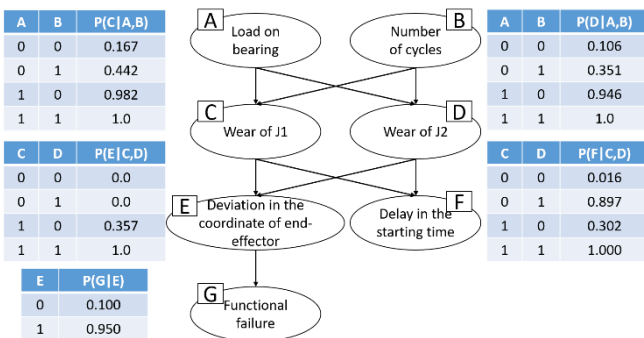


Fig. 10 Causality model of the 3DOF manipulator

作成した因果関係モデルから、動き出し時間の遅れが観測された際に機能的故障が発生している確率  $P(G|F)$  と、ジョイント $J_1$ の変位が生じている確率  $P(C|F)$  を推定した。

使用方法の異なる 4 人のユーザによって運用されるものとして事前確率を設定し、シミュレーションを行った結果を

Fig. 11 に示す。動き出し時間の遅れが観測されたことにより、観測前の確率  $P(G)$ 、 $P(C)$  から値が更新されたことが確認できた。

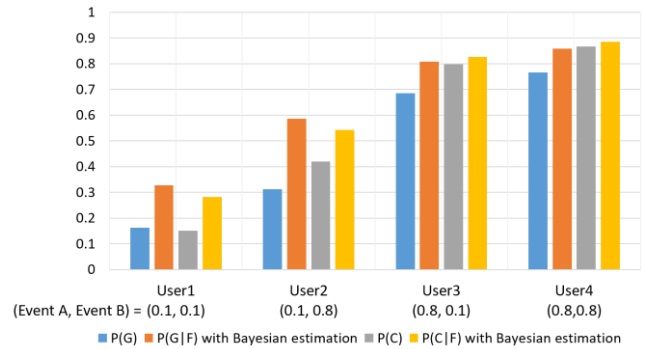


Fig. 11 Posterior probability of Event F

先行研究では規定の劣化プロセスに限定されていた実装を変更し、劣化データベースを用いた劣化シミュレーションを行った結果、部品同士の因果関係を明確にした上で状態予測を行うことができた。

## 6. 結論

本論文では、部品の状態予測に用いる因果関係モデルを作成するために必要となる、劣化に関する情報を検索・利用できる劣化データベースの導入を行った。

このシステムを活用することで、三自由度マニピュレータに限らず、様々な製品の状態予測が可能になるため、今後は他の例でシミュレーションを行い、このシステムの有用性について検証する必要がある。また、部品エージェントシステムへの保全行動提案手法についての適用方法の考案も、今後の展望として挙げられる。

## 参考文献

- (1) 環境省\_循環型社会形成推進基本法の趣旨, <http://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/shushi.html> (accessed 2021-01-29)
- (2) Y.Yokoki, K.Nanjyo, Y.Yamamori,H.Hiraoka, “User model in the life cycle simulation of mechanical parts”, Eco Design(2015), pp.353-365
- (3) T.Nagahata, H.Saitoh, H.Hiraoka, “Application of causality model to propose maintenance action of parts”, Eco Design(2019), pp.325-338
- (4) G. Borriello: RFID, Tagging the World, Communications of the ACM, Vol. 48, No. 9, pp34-37, (2005)
- (5) 高田祥三 LCC を最適化する論理的・合理的設備管理 ライフサイクルメンテナンス, JIPM ソリューション, 東京(2006), pp.84-92.
- (6) 本村陽一, 岩崎弘利, ベイジアンネットワーク技術—ユーザ・顧客のモデル化と不確実性推論, 東京電機大学出版局, 東京(2006).
- (7) R.Motwani, P.Raghavan, “Randomized algorithms”, Cambridge University Press(1995).
- (8) 益田直樹, 平岡弘之, 部品エージェントが用いる製品モデルの機能, エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム 2018 Proceedings(2018), pp.127-129