

令和元年6月12日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05772

研究課題名(和文) 部品エージェントによるベイズ推定に基づく部品のリユース支援

研究課題名(英文) Support of part reuse based on Bayesian estimation by part agents

研究代表者

平岡 弘之(Hiraoka, Hiroyuki)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：20165161

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)：循環型社会の実現に有効とされるリユースの促進のために、RFIDとネットワークエージェントを組み合わせることで個々の部品のライフサイクルを管理する部品エージェントが、ユーザーのリユースに関する助言を与えるしくみを開発した。予測が困難な劣化・故障現象を扱うためにベイズ推定の手法を適用した。劣化プロセスに基づく故障推定のための因果関係モデルを生成し、それをもとに劣化シミュレーションにより初期の条件付確率を与えてベイジアンネットワークを生成する手法を開発した。また、シミュレーションのための製品モデルの利用方法とともに、部品を組立品から取り外す分解指示を組立品の画像上にAR技術を用いて提示する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

手法の有効性は今後さらに確認する必要があるが、劣化・故障のプロセスにベイズ推定を適用する手法は新規性があると考えている。リユースの促進は循環型社会の実現と発展に大きく貢献することが期待でき、社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：For the promotion of reuse which is effective for the realization of the circular society, a system was developed that gives the advice on the reuse to the user by the part agent which manages the life cycle of an individual part by combining RFID and network agent. Bayesian estimation method was applied to deal with the deterioration and failure that are difficult to predict. A method was developed that generates a causal relation model for the failure estimation based on the deterioration process, and, on the basis of it, generates Bayesian network by giving initial conditional probability by the deterioration simulation. Furthermore, an application method of a product model for simulation was developed, as well as a method to present disassembly instructions for removing parts from assemblies over images of the assemblies using AR technologies.

研究分野：計算機援用設計製造

キーワード：ライフサイクル工学 部品リユース ベイズ推定 ネットワークエージェント 循環型社会

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

循環型社会を実現する方策の中で、機械部品のリユースについては、リサイクルに比べて環境への効果が大いにもかかわらず、リユース製品を除いてはあまり普及していない。その原因の一つは、個々のリユース品の過去の使用状況とそれが今後の利用に及ぼす影響が見えない点にある。この問題を解決するためには、個々の部品のライフサイクルにわたりその使用履歴を管理し、それに基づいて劣化の進展や故障の発生を予測するしくみが必要である。そのために、企業の管理によらない、ネットワークに基づく手法として、個々の部品に対してネットワークエージェントを個別に用意し、部品に貼付した電子タグを介して部品との対応付けを行って管理する部品エージェントを提案した。

劣化の進展や故障の発生については、多くの研究が行われているが、制御された条件下での特定の材料・機器に対する長期的傾向以外は、具体的な予測が一般に困難である。このため、各種の要因と劣化・故障とを関連づける確率的モデルを用い、部品ごとに得られた情報に基づいて、劣化進展や故障発生の確率をしばっていくベイズ推定の手法を適用する。

ベイズ推定などの機械学習の手法は、画像処理の分野や人間の行動に関わる分野での応用に比べて、機械製品の分野での適用例は多くない。機械分野では設計や制御のように理論から確定的な結論や手法を導ける場合が多いためと考えられるが、劣化現象や人間の行動を含む状況においては、不確定な要素が大きく、確定的な議論が困難な場合が多い。

2. 研究の目的

部品エージェントによるベイズ推定に基づいた部品のリユース支援のしくみを開発する。そのために以下の研究項目を計画した。

(A) 部品状態の予測へのベイズ推定の利用： ユーザの行動、部品に関する計測情報、劣化の進展、故障の発生などの間の因果関係を表すベイズネットワークをもとに、部品の故障確率を推定する基本的な方法を考案する。

(B) ライフサイクルとベイズ推定による部品交換に関する助言の生成： 部品のライフサイクルシミュレーション(LCS)とベイズ推定の手法を組み合わせ、近い将来の部品の状態を予測し、部品交換に関するアドバイスを生成するしくみを開発する。

(C) ベイズ推定のための事前確率の更新： 対象の部品とその利用について、実際の要因事象の発生に応じて要因の事前確率を更新する方法を開発する。

(D) ユーザへの情報の提示： 部品情報と部品交換のアドバイスをユーザに適切に提示するしくみを開発する。

3. 研究の方法

(1) 部品エージェントによるリユース支援： リユースを促進する基盤として部品エージェントを用いる。部品エージェントは、実世界の部品に追従しながらネットワーク上を移動し、部品のライフサイクル全体にわたりその状態を管理するとともに、ネットワーク上のデータベースやアプリケーション、センサなどから情報を収集する。実世界で部品は生産、販売、利用、修理などのライフサイクルのステージを移るにつれてその物理的位置も移動するが、部品エージェントも対応する実部品に追従してネットワーク上を移動し、その状況と場所に依じた情報の提供、及び部品の劣化状態の推定による適切な保全行動の立案を行う。

(2) 部品のライフサイクルモデルに基づくライフサイクルシミュレーション： リユースの研究は、時間的、空間的、社会的な制約のためシミュレーションによらざるをえない。生産、販売、利用、保守、リユース、廃棄といった部品の一生を表すライフサイクルのモデルをベースに、ライフサイクルの各ステージでの個別の部品の状態、ユーザの操作、環境の状態などを考慮したシミュレーションを行い、その結果に基づいた予測により部品エージェントが適切な助言を行うことで、リユースを促進するしくみを開発する。

(3) ベイズ推定を利用した予測： 背景でも述べたが、劣化の進展や故障の発生を確定的に捉えるのは困難であるため、確率的な扱いを行う。関連する事象の発生に基づいて確率の精度を上げるベイズ推定の手法が有効であると考え、これを用いる。

(4) 分解手順提示システムの開発： 部品のリユースの促進に対するもう一つの障害は、部品の分解・組付けと考える。専門の業者によらず一般の利用者がそうした作業を行う場合、また部品の劣化などのために設計時の作業手順がそのまま適用できない場合などを想定すると、分解手順を作業者にわかりやすく提示するしくみが必要と考えられ、実際の組立品の画像に重ね合わせて指示を表示するしくみを開発する。

4. 研究成果

(1) 拡張ライフサイクルモデルによる部品の状態予測 (これまでの成果)

本研究開始までに、すでに以下の(1.1)、(1.2)、(1.3)の項目のしくみを部品エージェントの機能として開発済みである。これらの成果をもとに研究を行った。

(1.1) 拡張ライフサイクルモデルの生成 部品のライフサイクルにおける生産、利用、廃棄などの各ステージとその間の遷移関係を表したものをライフサイクルモデルと呼ぶ。将来の部品の状態を予測するために、ライフサイクルモデルを時間に従って展開した拡張ライフサイクルモデルを作成する。

(1.2) ライフサイクルステージの評価 ライフサイクル中の各ステージを評価するために、そのステージでの、部品の状態、ユーザの操作、環境の状態に基づいて、そこで生じるコスト、環境負荷、利益を求める。将来のステージについては、そのステージでの値にそこに至る遷移経路をとる確率をかけあわせて推定する。現在取りうる候補のステージに対し、そのステージでの値に、その先に生じうるすべてのステージの値も加え統合して、その候補ステージの推定値とする。これらの推定値を用途に応じて組み合わせてその候補ステージの評価値とし、これらと比較することで最適な候補ステージを選択し、ユーザに助言する。

(1.3) ライフサイクルステージ間の遷移確率の推定 各ステージのコスト、環境負荷、利益については、部品の状態、ユーザの操作、環境の状態などから推定されるが、ステージ間の遷移確率については、推定が困難であり、適切な推定方法が課題となった。

(2) 劣化故障プロセスに基づく因果関係モデルの生成

利用からの遷移を考えると、修理、廃棄など、劣化の進展や故障の発生が遷移確率に大きく影響すると考えられるため、劣化・故障プロセスを生成し、それに基づいて故障発生率を計算するしくみ（図1参照）を開発した。

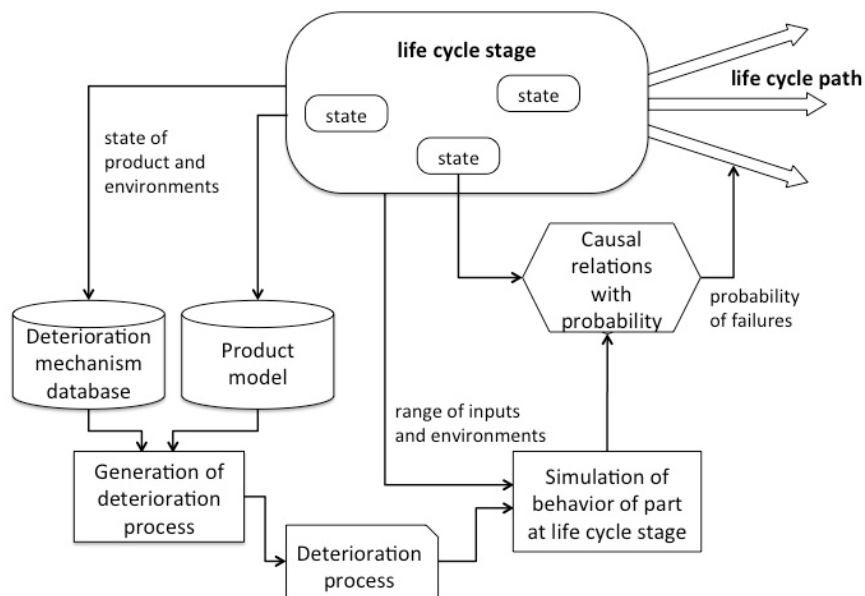


図1 劣化・故障プロセスに基づく故障発生確率の推定

(2.1) 劣化メカニズムデータベースに基づく劣化の定性的因果関係の生成 高田らの手法（文献1）に基づいて、劣化・故障プロセスを生成する。各種の劣化現象について、劣化現象を引き起こす原因となる要因と劣化現象が結果として引き起こす要因とを関連づけたものを劣化メカニズムと呼ぶ。各種の劣化メカニズムをデータベースに保存しておき、現在の要因群から生じる劣化メカニズムを選んで劣化プロセスに追加するとともに、劣化メカニズムにより生じる要因を現在の要因群に追加する。この手順を、部品の状態、環境の状態などから得られる要因から始めて現在の要因が無くなるまで繰り返すことで劣化プロセスを生成する。劣化メカニズムは劣化現象の原因と結果を表したものであるため、できがかった劣化プロセスは劣化・故障に関する定性的な因果関係と見なすことができる。

(2.2) シミュレーションによる因果関係モデルの条件付事前確率の生成 生成された因果関係モデルをベイズ推定に用いるためには事象間の条件付事前確率を求める必要がある。事象の生起に関するパラメータを設定し、パラメータの範囲と其中での生起/非生起の閾値を定めることで定量化してシミュレーションを行う。シミュレーションの詳細は次項で述べるが、その結果得られた条件付確率によって因果関係モデルをベイジアンネットワークとすることができ、部品の状態、環境の状態、ユーザの操作、および観測された事象から、故障発生率を計算・更新できる。

（文献1）Takata, S., Shiono, H., Hiraoka, H., Asama, H., Case-based evaluation of potential deterioration for facility life-cycle management, CIRP Annals, Vol. 46, 1, pp. 385-390 (1997)

(3) 劣化予測のためのシミュレーション

シミュレーションにより劣化メカニズムの事前確率を求める方法を開発した。たとえば、繰返し荷重をうけるばねの場合、大きな応力と大きな繰返し数で破断が生じる疲労破壊の現象がS-N曲線として知られている（図2参照）。事前確率はモンテカルロ法で求める。すなわち、生じうる応力の範囲と大きな応力の閾値、生じうる繰返し数の範囲と大きな繰返し数の閾値に対

して、応力と繰返し数を一様乱数に従って発生し、両方の事象の生起/非生起の各組合せについてS-N曲線による破断の割合を数えることで、事前確率の表を作成する。

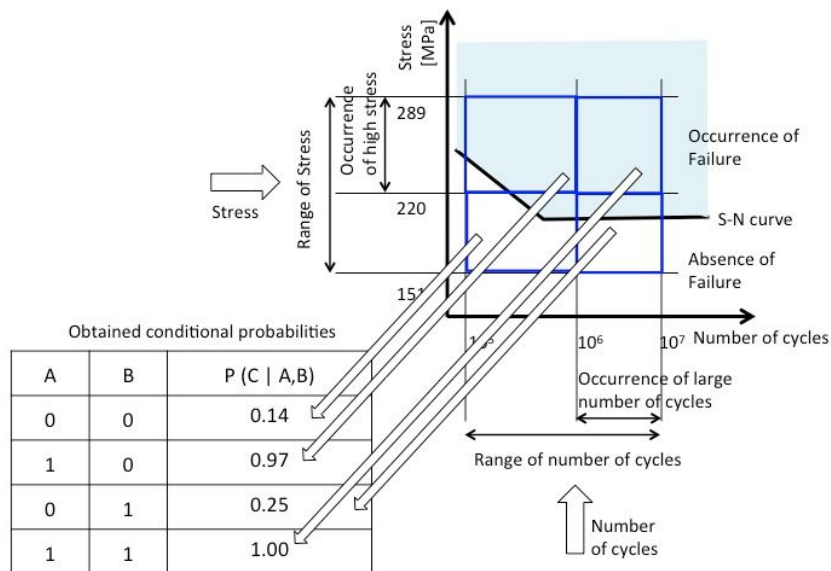


図2 繰返し荷重を受けるばねの破断の条件付確率の生成

この手法はもう少し複雑なシミュレーションを必要とする場合にも適用できる。例として、3自由度マニピュレータの関節部の劣化により手先の過大な偏差が生じる現象を対象とした(図3参照)。マニピュレータは、与えられた荷重を運ぶ一定の動作を繰り返し行うとする。関節の劣化モデル、すなわち関節に加わる荷重と生じる偏差の関係が与えられているとすると、力学計算により求まる関節部にかかる荷重に対して劣化により関節部に生じる偏差を計算できる。これにより機構学計算を用いて手先の偏差を計算できる。この方法で上記のばねの場合と同様に、過大な荷重、過大な速度の生起の有無に対する過大な誤差の発生の事前確率の表を作成できる。

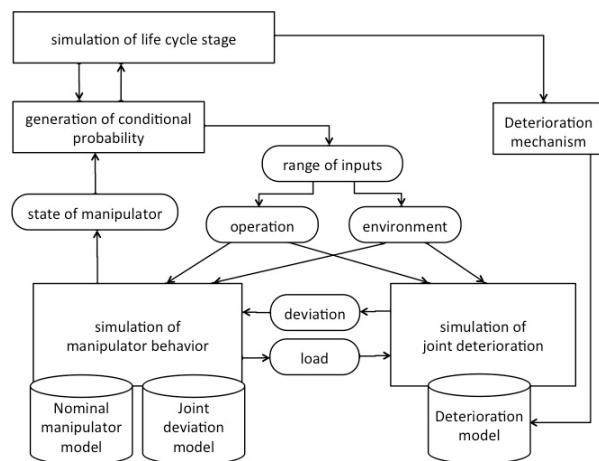


図3 関節の劣化を考慮したマニピュレータのシミュレーション

(4) 部品リユースのための部品分解手順の表示

前記したように、部品のリユースの促進の障害になっている点の一つが、部品の分解・組付けの作業である。このために、AR (Augmented Reality, 拡張現実) の技術を用いて、分解作業を撮影しているカメラ画像上に分解指示をオーバーレイ表示するしくみを開発し、パソコンの分解を対象にプロトタイプシステムを開発した。部品に添付したマーカを基準に画像処理によって座標系の位置合わせを行い、製品モデルから得られる組立構造をもとに生成した組立手順と部品の形状情報から、分解する部品の形状と分解方法の指示とを実部品に重ね合わせて表示

した。

(5) 研究成果の評価と今後の課題

当初、想定した研究項目についての達成度は以下の通りである。

(A) 部品状態の予測へのベイズ推定の利用

ベイジアンネットワークに基づく基本的なしくみ、すなわちユーザの操作の情報と発生する事象に基づいて部品の故障確率を推定する方法を実装した。劣化メカニズムを組み合わせた劣化プロセスに基づいて故障推定のための因果関係モデルを生成し、それをもとに劣化シミュレーションにより初期の条件付確率を与えてベイジアンネットワークを生成する手法を開発した。

(B) ライフサイクルとベイズ推定による部品交換に関する助言の生成

部品のライフサイクルのステージ間を遷移するパスの確率を、当該ステージで生じている事象に基づいてベイズ推定を行って求め、それに基づくライフサイクルシミュレーションを行って部品の状態を予測する手法を開発した。また、ライフサイクルシミュレーションのための製品モデリングシステムの機能について要件を明らかにし、実装を行ってその効果を示した。

(C) ベイズ推定のための事前確率の更新

研究の結果、想定した方針での更新方法の実現には、問題があることが判明した。ベイジアンネットワークの対象、構成、表現などについて整理を行い、統一的な表現のしくみを構築する必要がある。(A)で述べた劣化プロセスの利用をその端緒とみなすこともできるが、今後、解決すべき大きな課題である。

(D) ユーザへの情報の提示

現場に設置されたカメラからの画像に、製品の組立情報に基づいて分解手順情報を AR (Augmented Reality) 表示するしくみを開発した。部品エージェントとの連携を行うために組立情報を部品単位で構成するしくみを提案した。ライフサイクル情報の利用については未完成であるが、基本的な提示手法については確認できた。

今後の課題としては、本手法の実装と具体的例題への適用がある。実際に部品リユースを行う場合に生じる問題を確認する目的で、モジュールごとに交換可能なマニピュレータを設計、製作中である。劣化の検出、交換作業の手順などを含めた部品エージェントの実装を行い、複数のマニピュレータ間のモジュール交換を通じて本手法の効果を確認する。また、複数のエージェント間の連携も課題である。前回の補助金で、個人同士で中古部品を交換するリユースを想定し、中古部品の仕様、残存寿命、相手までの移動距離を勘案した満足度を定義し、それに基づいてリユース希望者間のマッチングを行って部品の交換を行う方法を提案した。今回、マッチングを行う前に行う個人の移動可能距離によるリユース希望者のグルーピングを必要としない手法を開発できており、その効果を確認したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 20 件)

(1) 長畑, 齋藤, 平岡, ライフサイクルシミュレーションのための部品の劣化に関する因果関係モデルの作成, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.XX-YY, 2019.

(2) 益田, 平岡, 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 EcoDePS2018, pp.127-129, 2018.

(3) 長畑, 齋藤, 平岡, 部品の状態の因果関係に基づく保全行動の決定, 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.32-33, 2018.

(4) 福増, 平岡, 部品エージェントを用いたマニピュレータ間のモジュール交換, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.803-804, 2018.

(5) 長畑, 福永, 益田, 平岡, 部品エージェントのための ライフサイクルシミュレーションへのベイズ推定の利用, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.799-800, 2018.

(6) 長沢, 平岡, 機械部品のリユースのための部品エージェントを用いた分解支援, 2018 年度精密工学会春季大会, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.801-802, 2018.

(7) Fukumashi, Y., Nagasawa, A., Fukunaga, Y., Hiraoka, H., Exchange of modules among robot manipulators using part agents, 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing EcoDesign 2017, A7-2, 2017.

(8) Nagasawa, A., Fukumashi, Y., Fukunaga, Y., Hiraoka, H., Disassembly support for reuse of mechanical products based on a part agent system, 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing EcoDesign 2017, D6-3, 2017.

(9) Fukunaga, Y., Fukumashi, Y., Nagasawa, A., Hiraoka, H., Bayesian estimation for the reuse of mechanical parts using part agents, 10th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing EcoDesign 2017, E1-1, 2017.

(10) Hiraoka, H., Nagasawa, A., Fukumashi, Y., Fukunaga, Y., Replacement of parts by part agents to promote reuse of mechanical parts, 14th IFIP WG 5.1 International Conference PLM 2017, pp.394-403, 2017.

(11) 福増, 平岡, 部品エージェントを用いた部品交換—実験システムの構築—, EcoDePS2016 エコデザイン・プロダクツ&サービス 2016 シンポジウム, 3-4, 2016.

(12) Nagasawa, A., Hiraoka, H., Part agent's support for disassembly of mechanical product, The 16th International Conference on Precision Engineering, 2016.

(13) 福永, 平岡, 部品エージェントによる機械部品の再利用のためのベイジアンネットワーク 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会, pp.385-386, 2016.

〔図書〕(計 3 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。