

機械製品のライフサイクルシミュレーションのための組立モデル

Assembly model for life cycle simulation of mechanical products

精密工学専攻 42号 田中 貴大
Takahiro Tanaka

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⁽¹⁾。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、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⁽²⁾。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、部品の製造から廃棄までのライフサイクルの情報を管理するシステムである。部品エージェントは、担当する部品に対する保全行動の助言を生成するために、部品の使用段階では、その時点での部品の状態をもとに、部品のライフサイクルに関するシミュレーションを行って、部品の短期的な将来予測を行う。このライフサイクルシミュレーション(LCS)を行うためには、対象となる製品のモデルを定義する必要がある。既存の研究では、部品エージェントを利用した LCS のための製品モデルを作成する製品モデリングシステムが開発された⁽³⁾。しかし、このシステムでは、製品の組立構造の表現が不十分であった。組立製品は個々の部品の劣化により故障する可能性があり、部品の修理や交換は組立製品のライフサイクルに影響を与えるため、機械製品のライフサイクルにおいて組立構造の表現は重要な役割を果たしている。

そこで本研究では、機械製品のライフサイクルシミュレーションのための組立モデルを提案し、組立モデルをコンピュータに適用し、部品交換のシミュレーションを行うことを目的とする。

2. 組立情報に基づく製品のライフサイクル支援

2.1 ライフサイクルシミュレーション

部品の劣化を予測し、ユーザに適切な保全行動を提案するためには、製品ライフサイクルの適切な設計・管理が必要である⁽⁴⁾。製品ライフサイクルとは、製品、および部品の製造から使用、修理、分解、再使用を経て、最終的に廃棄されるまでに製品が迎える一生のことである。これらのライフサイクルの各段階をライフサイクルステージと呼ぶ。資源をより有効利用するためには、製品、および部品のライフサイクルが循環的になるよう管理することが重要である。LCS は、製品の適切なライフサイクルを設計するために、ライフサイクル

を評価する手法として開発されてきた⁽⁵⁾。

2.2 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では、一つの製品や部品に一つの専用のエージェントが割り当てられ、製品や部品の状態、製造情報、使用履歴などの情報を収集し、ユーザが製品や部品のメンテナンスについての的確に判断できるように提示する。部品に RFID (Radio Frequency Identification) タグ⁽⁶⁾を取り付けることで、ネットワーク上の部品エージェントは、生産工場、修理工場、消費者、小売店などの間を移動する対応する部品を追跡する。RFID は、ネットワーク内の各機能と通信し、製品の設計情報など、対応する部品を管理するために必要な情報を取得する。そして、エージェントは、対応する部品に対して、その時点で最も適切な保守作業を考案し、ユーザに提案する。

Fig. 1 は部品エージェントシステムによるアドバイス生成の構想図である。部品エージェントは部品の使用状況に合わせた将来予測を行うため、現在の部品の状態から劣化モデルを元に、部品の故障確率、劣化、利益、コスト、環境負荷を算出する⁽⁷⁾。これらの情報を用いて部品エージェントは部品のライフサイクルを時間経過に沿って展開し、部品が迎えるライフサイクル経路の比較検討を行う。

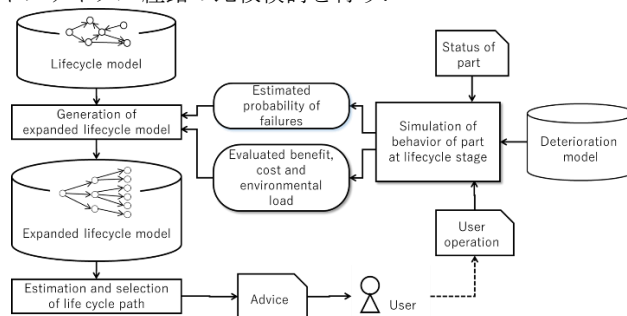


Fig. 1 Frame work of part agent for advice generation

2.3 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

Fig. 2 はライフサイクルシミュレーションにおける製品の劣化予測の概要を、実行する処理(プロセス)、使用するモデル、受け渡し情報の三つの要素で表した。製品・部品に取り付けられたセンサなどから取得できる情報や、使用時の状況、環境の情報から部品の劣化と挙動をシミュレーションする。この二つのシミュレーションは互いに関連しており、部品の劣化は、製品の挙動に由来する負荷が原因であり、製品の挙動は、部品の劣化による偏差の影響を受ける。各部品の偏差情報から製品の状態を更新し、更新された製品の状態に基づき、シミュレーションを行う。

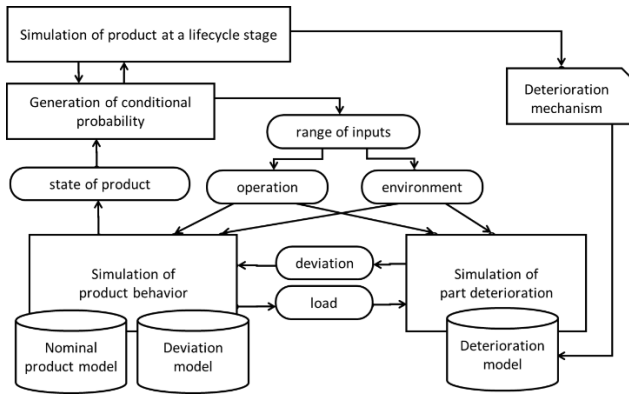


Fig. 2 Product deterioration prediction in life cycle simulation

2.4 製品と組立構造の利用と要件

序論で述べた通り、部品エージェントは部品の将来予測に基づいてユーザに部品交換のアドバイスを行う。将来予測は劣化に関わる事象の間関係を示す因果関係モデルを作り、それに基づいて故障確率を推定して行う⁽⁸⁾。そのために、部品の情報に基づくLCSをする。このLCSでは、形状・質量・材料特性・接続関係、劣化による形状の変化や挙動の変化、部品の劣化や部品間の相互作用による各部品の挙動変化を管理する必要がある。これらの情報を集約し組立品と部品の両方を管理するために組立モデルを提案する。組立モデルは製品の情報を保持し、挙動・負荷の計算、部品の劣化モデルから劣化の計算を行う。詳細を次章で述べる。

3 ライフサイクル支援のための組立モデル

3.1 組立モデルの概要

組立モデルを製品のライフサイクルシミュレーションに適用する場合、部品やアセンブリの挙動や劣化・偏差を表現する必要がある。Fig. 3は、LCSのための組立モデル⁽⁹⁾で、部品の挙動、劣化、偏差の情報と、組立構造の情報を含んでいる。機械製品の劣化(Fig. 3の赤枠)は、部品に発生する。部品の劣化は組立品の幾何学的なずれを生じさせる。また、部品に荷重がかかると、部品の劣化が起こり、部品に偏差が生じ、部品の挙動 (Fig. 3の青枠部分) に影響を与える。この部品の挙動は、接続された部品の挙動に影響を与え、さらに組立品の挙動に影響を与える。

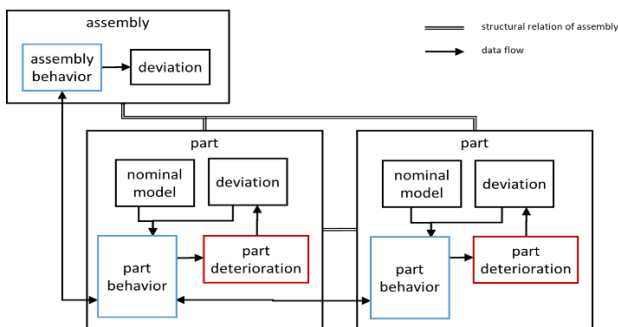


Fig. 3 Assembly model with representations of behavior, deterioration, and deviation

3.2 マニピュレータへの適用

組立モデルを、マニピュレータを例にして開発した。このマニピュレータは複数のモジュールから構成され、各モジュールはリンクとジョイントを有している。各モジュールは部品エージェントによって管理され、LCSの結果に基づいて交換・再利用されると仮定する。Fig. 4に、LCSに用いるマニピュレータの組立モデルを示す。マニピュレータを表現する組立モデルは、部品を表現する複数の部品モデルで構成する。部品モデルには、運動学的な情報、力学的な情報が含まれている。LCSでは、部品の順運動学と動力学を計算することで、各部品の挙動が決定される。計算は、マニピュレータの機構構造に沿って、モジュールからモジュールへと直列に行われる。また、推定された力とトルクをもとに劣化モデルを用いて、モジュールの劣化を推定し、モジュール内の偏差を計算する。

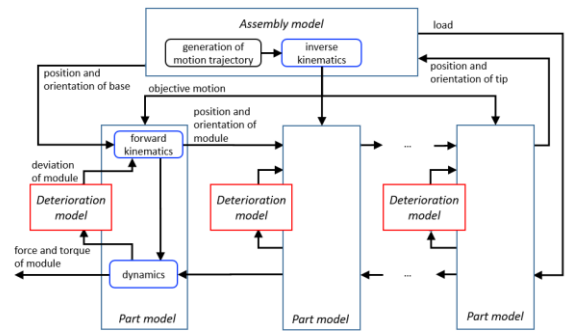


Fig. 4 Assembly model for a manipulator

k 番目のモジュールの位置と姿勢を表す変換行列 T_k は、順運動学により、式(1)のように計算される。

$$T_k = T_{k-1} \times T_{jk}(\theta_k) \times T_{LK} \quad (1)$$

ここで、 T_{LK} はリンク k の2つの関節間の変換を表し $T_{jk}(\theta_k)$ は、関節角度 θ_k を持つ関節 k によって接続された2つのリンク間の変換を表す。

本シミュレーションでは、劣化はモジュールの関節部で発生すると仮定した。ジョイント k に並進方向の偏差 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ と回転偏差 $(\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$ が発生した場合、変換 T_k は、この偏差を表す式(3)の変換行列 T_{dk} を用いて、式(2)のように算出した⁽¹⁰⁾。

$$T_k = T_{k-1} \times T_{dk} \times T_{jk}(\theta_k) \times T_{LK} \quad (2)$$

$$T_{dk} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta \gamma & \Delta \beta & \Delta x \\ -\Delta \gamma & 1 & -\Delta \alpha & \Delta y \\ -\Delta \beta & \Delta \alpha & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

モジュールの劣化を評価するために必要な力とトルクは、以下の力学式(4)~(7)によって算出する⁽¹⁰⁾。

$$F_{Lk} = m_k(a_{ik} + g) \quad (4)$$

$$M_{LK} = I_k \dot{\omega}_k + \omega_k \times I_k \omega_k \quad (5)$$

$$F_{JK} = C_{k+1} F_{Jk+1} + F_{LK} \quad (6)$$

$$M_{JK} = C_{k+1} M_{Jk+1} + r_{JK+1} \times C_{k+1} F_{Jk+1} + M_{Lk} + r_{JK+1} \times F_{LK} \quad (7)$$

なお、モジュールの運動学的挙動と力学的挙動は、接続され

たモジュールに影響を与え、また影響を受ける。

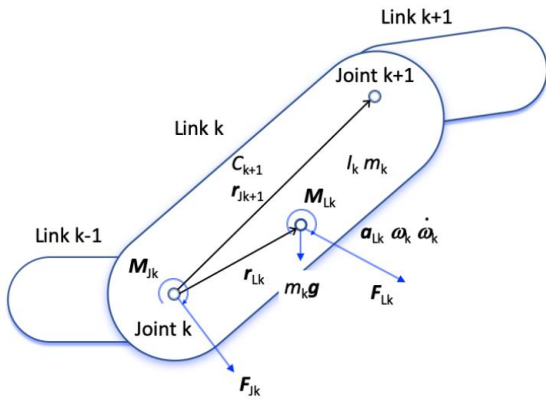


Fig. 5 Symbols for dynamics of a link module

劣化モデルでは、関節の偏差を引き起こす劣化は、関節にかかる力とトルクによって引き起こされると仮定している。簡単のために、劣化偏差は弾性偏差の累積に比例すると仮定する。弾性偏差 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$ と関節にかかる力 (F_x, F_y, F_z) とトルク (M_x, M_y, M_z) の間には次のような弾性関係が存在する。

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \gamma \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、 K^{-1} は関節のコンプライアンス行列である。

4 組立モデルに基づく製品の部品交換

4.1 組立モデルに基づく部品交換の概要と目的

組立モデルを用いて、マニピュレータの部品交換を行う⁽¹⁾。概要図を Fig. 6 に示す。組立製品の部品個々を表す部品モデルは、自身の運動学情報、力学情報、劣化モデルといった情報を持つ。ある部品を別の部品と交換する場合、元々持っていた情報を交換後の部品の情報に置き換える。自身の部品モデルが交換された組立モデルが交換前後、問題なく動作することを組立モデルを適用したマニピュレータの部品交換シミュレーションを行い確認する。

今回は2つの部品エージェントを取り付けた2つのマニピュレータを用いてシミュレーションを行う。

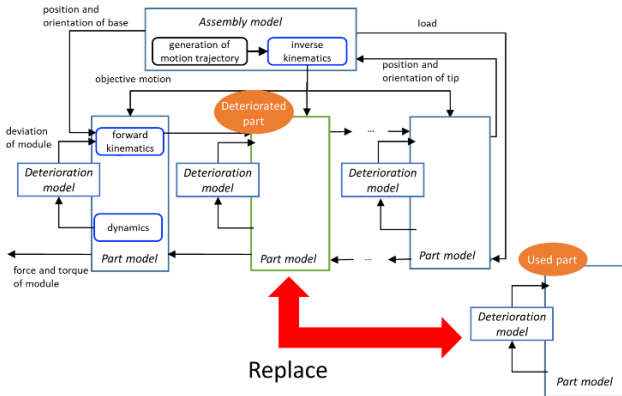


Fig. 6 Schematic of parts replacement

4.2 部品交換シミュレーションの流れと条件

組立モデルを導入したマニピュレータのモデルを作成し、シミュレーションを行った。シミュレーションで扱うロボットアームは三つのリンク、三つの回転関節、手先部品からなる3自由度マニピュレータである。

本研究では、マニピュレータの動作条件として、根本側関節(Joint0 と Joint1)は動かさずに、手先側関節(Joint2)を1秒間に $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ \rightarrow -90^\circ \rightarrow 0^\circ$ と変化させる。劣化する部品は関節のみとする。また、角度制御を行うため運転条件は関節の角度情報のみであるとする。

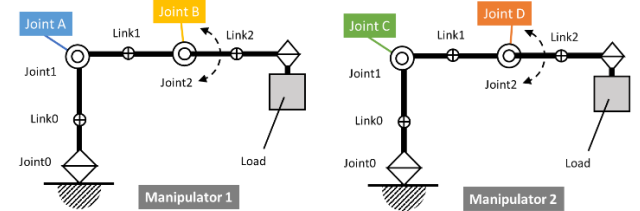


Fig. 7 Manipulators used in the simulation

シミュレーションの流れを説明する。Fig. 7 の通り2台のマニピュレータ Manipulator1, Manipulator2 を用意する。シミュレーション期間2日間とする。一つのマニピュレータには手先に0.1kgの荷重を取り付け、一日当たり1時間動かす。もう一つには0.02 kgの荷重を取り付け、一日当たり30分動かすものとする。2つのマニピュレータは同時に動かすものとした。Manipulator1 の Joint1 を Joint A, Joint2 を Joint B, 同じく Manipulator2 の関節をそれぞれ C, D とした。

一つのマニピュレータに一つの部品エージェントが取り付けられ、一日置きに部品エージェントが関節の劣化状況から交換の判断をする。部品エージェントは交換のための基準劣化量のデータを持ち、Manipulator1 からその値と比べてより劣化量が多い関節、Manipulator2 から劣化量が多い関節をそれぞれ選択し、部品の交換を促す。

4.3 実行結果・考察

シミュレーションを実行した結果を Fig.8~10 に示す。縦軸は関節の劣化量、横軸は時間を示している。今回、横軸の時間はマニピュレータを実際に動かした時間としている。Fig. 8,9 はそれぞれのマニピュレータの二つの関節の劣化を示す。1日目のマニピュレータの稼働終了後、Manipulator1 の Joint1 劣化量が減少し、Manipulator2 の Joint2 の劣化量が増加している。このことから Manipulator1 の Joint1 と Manipulator2 の Joint2 の交換が行われた。

次に Fig.10 について説明する。Fig. 10 に Joint A, D の劣化量を示す。Joint A は交換後、使用量が少ない Manipulator 2 に取り付けられたため、劣化の増加率が最初と比べて、低くなっている。逆に Joint A は交換後、使用量が多い Manipulator 2 に取り付けられたため、劣化の増加率が大きくなっていることが分かる。

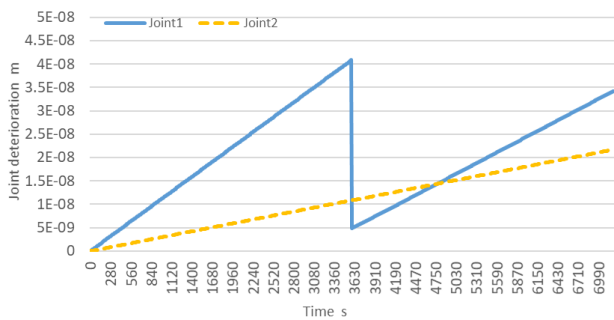


Fig. 8 Deterioration of joints of Manipulator 1

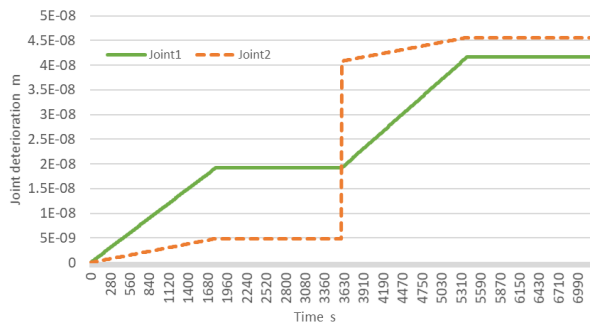


Fig. 9 Deterioration of joints of Manipulator 2

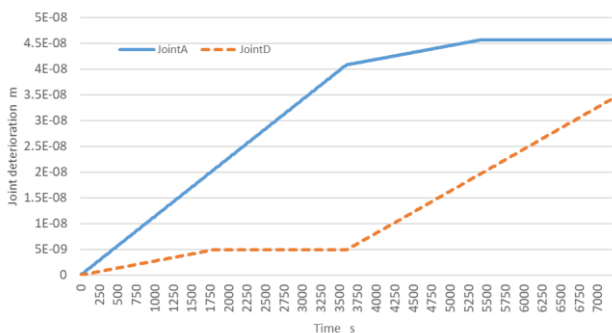


Fig. 10 Deterioration of joint A and D

以上の結果から組立モデルを導入したマニピュレータの部品交換が問題なく行えていることが分かる。また部品交換を行ったことにより、交換した2つの劣化量が均一な値に近づいた。このことから、(1)組立製品の特定の部品の劣化の増加を防ぐことができる。それにより部品の故障および組立製品の故障を防ぐことが可能だと考えられる。(2)使用時間の少ない部品をすぐに廃棄に出さず交換に出すことにより、廃棄する部品数を減少させ、リユースを推進できると考えられる。

今回のシミュレーションでは部品の交換は、規定の基準値を用いたが、組立品・部品共に現在の動作状況・劣化状況からライフサイクルを更新、次のライフサイクルステージを予測、その予測に基づき組立品や部品がそれぞれ適した動作をし、ライフサイクルを管理する仕組みが必要であると考えられる。組立品のライフサイクルと部品のライフサイクルは異なるが、組立製品が使用段階にあるときは、部品も使用段階にあるというようにライフサイクルを連携及び管理させる必要がある。その方法として以下を提案する。(1)部品に取り付けられた部品エージェントが LCS を行い次のライフサイクルを選択し、この情報を組立品に取り付けられた組立エージェ

ントに送る。(2)組立エージェントは受け取ったライフサイクルの情報から、LCS を行い、自身のライフサイクルの次のステージを選択する。(3)更新されたライフサイクルの情報を得た組立エージェントはそれぞれの部品エージェントに挙動に関する指示を出し、その部品は指示通り動作する。

また、より現実に即したシミュレーションを行うため、今後、シミュレーション期間、マニピュレータの動作、部品の交換条件など検討する必要がある。

5 結論

機械製品のライフサイクルシミュレーションのための組立モデルを提案し、マニピュレータに適用した。また、組立モデルを導入したマニピュレータを用いて、部品交換のシミュレーションを行った。今後の展望として、部品と組立製品の両方のライフサイクルを考慮した部品交換のシミュレーションを行う必要がある。

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 2022-01-28)
- (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) 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・プロダクツ&サービスシンポジウム 2018 Proceedings*(2018), pp.127-129
- (4) 梅田靖, 阪井則雄, 富山哲男, ライフサイクルシミュレーションによる製品ライフサイクルの設計, *マテリアルライフ学会誌*, 13-3(2001) pp.105-109.
- (5) Y. Umeda, S. Takata, F. Kimura, T. Tomiyama, J. W. Sutherland, S. Kara,C. Herrmann, J. R. Duflou, *Toward integrated product and process life cycle planning—An environmental perspective*, *CIRP Annals*, 61, (2012)pp. 681–702.
- (6) G. Borriello: RFID, Tagging the World, *Communications of the ACM*, Vol. 48, No. 9, pp34–37, (2005)
- (7) Yumihito Yokoki, Hiroyuki Hiraoka, Life cycle simulation of mechanical parts with part agent considering user behavior, *Procedia CIRP*, 61, (2017) pp. 116-121.
- (8) Hiraoka, H., Nagahata, T., Saito, H., Tanigawa, T., Estimation of prospective states of mechanical parts for lifecycle support by part agents, *Product Lifecycle Management in Digital Twin Era*, (2019) pp.213-222.
- (9) Hiroyuki Hiraoka, Takahiro Tanaka, Takumi Sugahara, Hiroki Saito Assembly model of mechanical products for their life cycle simulation, *Procedia CIRP*, 98, (2021) pp.553-558.
- (10) 高野政晴, 詳説 ロボットの運動学, 株式会社オーム社, 東京(2004).
- (11) Takahiro Tanaka, Hiroyuki Hiraoka, State prediction and parts replacement of a manipulator based on assembly model, *Proceedings of EcoDesign* (2021)