

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760121

研究課題名(和文) 製品ライフサイクルのシナリオに適應したモジュール構造設計手法の開発

研究課題名(英文) Development of a computer-aided modular design system based on product lifecycle scenarios

研究代表者

福重 真一 (FUKUSHIGE, SHINICHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10432527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：工業製品のライフサイクルを通じた資源消費量やエネルギー使用量を最小化するためには、製品の最適な資源循環戦略を策定すると同時に、その戦略の実現性を最大限に高めるような製品構造を設計することが不可欠である。本研究では、製品の資源循環戦略とこれを実現する手段としての製品設計との関係を形式化し、ライフサイクルの様々なシナリオに基づいた製品構造を設計するための戦略・製品統合型ライフサイクル設計支援手法を開発した。また、提案手法の計算機支援環境であるライフサイクルCADを構築し、いくつかの工業製品を対象としたライフサイクル設計の試行によって本システムの有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：For reducing environmental loads and resource consumption over the entire product life cycle without decreasing the product's value, life cycle design is a promised approach. Design of a product lifecycle involves planning lifecycle strategies, evaluating them from various viewpoints and optimizing the overall picture. Product lifecycle strategies can be planned explicitly by describing lifecycle scenarios at an early stage of lifecycle design and the product should be designed to realize the scenario. In this study, we developed a computer-aided design environment for lifecycle design called "Life-Cycle CAD" system. The system links a lifecycle model we defined with product architecture and manages the consistency between them. Case studies clarified that the relationship between the lifecycle model and the product model is successfully represented on a computer in an integrated manner to support product lifecycle design.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学

キーワード：ライフサイクル設計 CAD 資源循環 モジュール設計 環境配慮設計

1. 研究開始当初の背景

近年、工業製品の環境価値向上、資源生産性向上、ビジネスチャンス拡大といった視点から3R (Reduce, Reuse, Recycling)を中心とする高度な製品ライフサイクルシステムの実現が求められている。このような複雑な製品ライフサイクルを構築するためには、製品とそのライフサイクルの適切な設計が必要不可欠であるが、ライフサイクルそのものを明示的に設計するための方法論や、ライフサイクルに応じて最適な製品構造を設計するための方法論が必ずしも明らかになっていないという現状がある。例えば、定期的なメンテナンスに基づく長期使用型の製品と、大量生産・大量リサイクルを志向した製品とでは、その資源循環プロセスのみならず最適な製品構造が大きく異なるはずであるが、その関係は明らかではない。

2. 研究の目的

工業製品の高度なライフサイクルシステムの構築を目的として、製品のコンセプト、環境目標、市場特性、ビジネス戦略などに基づき、製品のライフサイクルそのものを明示的に設計・評価するとともに、このライフサイクルの実現に最適な製品の構造を設計するための支援手法を開発する。また、提案手法の実行環境として、製品のライフサイクルとモジュール構造とを統合的に設計するための計算機支援システム(ライフサイクルCAD)を、既存のソリッドCADをベースとして構築し、複数の製品を対象としたケーススタディによってシステムの有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

製品の一生にわたる環境負荷、エネルギー使用量、資源消費量の効果的な低減を果たすためには、設計の初期段階において製品のライフサイクル全体を視野に入れた適切な戦略を策定することが重要であり、研究代表者らは「ライフサイクルシナリオ」を記述することによって、様々なシナリオを評価・検証し製品のライフサイクル戦略を明確化するための手法を提案している。本研究では、このライフサイクルシナリオを用いてライフサイクル設計と製品設計との関係を定義することで、ライフサイクルの特性に応じた製品の構造や形状を設計するための支援システムを開発する。そのためには、製品ライフサイクル全体を計算機上で設計・評価可能な形にモデル化し、このライフサイクルモデルと製品モデルとの関係を定義する必要がある。また、図1に示すように、製品の状態は、組立やメンテナンス、分解、再生といったライフサイクルの各プロセスを通じて変化するため、ライフサイクルモデルと製品モデルとの連携によって、ライフサイクルを通じた製品の状態変化を表現可能にする必要がある。そこで、本研究で開発するライフサイクル

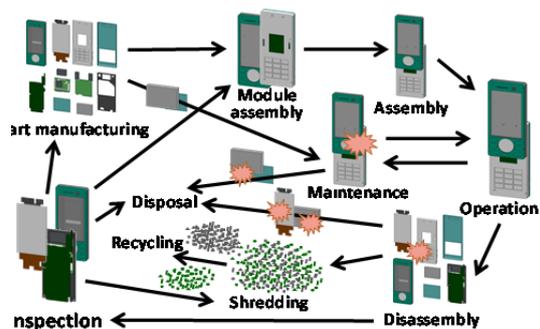


図1 ライフサイクル通じた製品の状態変化

CAD システムによって以下の3つの機能を実現する。

- 1) 製品とそのライフサイクルの統合的なモデリングと評価
- 2) ライフサイクルを通じて変化する製品状態の表現
- 3) 製品モデルとライフサイクルモデルの間の整合性管理

4. 研究成果

(1) ライフサイクルシナリオは、ライフサイクルの「目的」「コンセプト」「オプション」「フロー」「シチュエーション」の5つの要素から成る。このうち「ライフサイクルフロー」はライフサイクルシナリオの中心モデルであり、ライフサイクルの各プロセスを表すノードとプロセス間の関係を表す有向エッジから構成されるネットワークにより、製品、部品、材料の循環経路、プロセス間の情報や物質、金銭のやりとりを表現するものである。本研究では、製品ライフサイクルの表現形式としてライフサイクルシナリオを採用し、特にライフサイクルフローを基盤としてこれを拡張することで、後に述べる製品モデルとの連携形式を定義した。

また、設計したライフサイクルモデルの評価、すなわちライフサイクルを通じた製品の環境負荷、資源消費量、コスト、利益等の評価を行うためにライフサイクルシミュレーション(LCS)の技術を採用し、ライフサイクルCADの機能の一つとして実装した。

(2) 「構造」「形状」「属性値」の3つの側面から製品情報のモデル化を行った。構造モデルは、製品の構成要素を表すノードと要素間の接続関係を表すエッジから成るグラフによって製品の接続構造を表現した。形状モデルは、製品を構成する各部品の3次元ソリッドモデルとし、幾何情報、アセンブリ情報、幾何拘束関係等の情報を持つものとした。製品の属性値は、各部品の素材、重量、物理寿命、価値寿命、価格等の値のリストとした。これら3つのサブモデルは、接続構造モデルを中心としてそのノードと対応する形状モデルと属性値が互いに関連付けられ、それぞれのサブモデルの持つ情報は同期する。ただし、製品の接続状態や形状・属性値は、図1

に示したように、ライフサイクルの各プロセスを経由することにより変化する。例えば、使用による素材の劣化や残存寿命の短縮といった属性値の変化や、破碎による形状の変化などがある。同じく、部品同士の接続状態もまた、組立・分解プロセスによって締結・分離されるなどして変化する。本研究ではこのように様々なプロセスを通じて変化する製品状態を表現するために、上記の接続構造に加えて製品の「階層構造」を定義した。この階層構造モデルは、図2に示すように、構成要素間の接続構造を表す階層に対して更にその上位階層にノードを追加し、ノード間の階層関係を木構造によって表現したものである。この上位階層のノードは、ライフサイクルのいずれかのプロセスにおいて独立した一つのオブジェクトとして扱われる部品集合を表す。階層モデルは下位層に向かうほど製品が分解や破碎プロセスを通じて複数のサブモジュールに分離される過程を表しており、逆に上位層に向かうほど個々の素材や部品からモジュールや製品を構成していく過程を表す。更に、部品の製造プロセスや、使用済み部品の破碎やマテリアルリサイクル等のプロセスにも対応するため、接続構造を表す階層の更に下位の階層にもノードを展開し、部品やモジュールのみならずシュレッターダストや混合リサイクル材の状態もこれらのノードによって表現可能にした。

(3) ライフサイクルモデルと製品モデルの関係を、2つのトポロジー構造間関係として形式化した。本研究では、ライフサイクルの各プロセスを通過する部品や素材の情報を統合的に管理するため、図3に示すように、製品モデルのノードとライフサイクルモデルのエッジとの間に双方向リンクを持たせることで各プロセスを流れる製品の構成要素とその状態を表現した。図3の例は、Electrical ModuleがDisassemblyプロセスを経由することで2つのUnitに分解され、さらにControl UnitがShreddingプロセスによってShredded fragmentに変換されたことを表している。

また、製品とライフサイクルの2つのサブモデル間関係において必ず満たさなければならない条件として「保存則」「独立則」「排他則」の3つを定義した。

保存則は、任意のプロセスを通過する部品や材

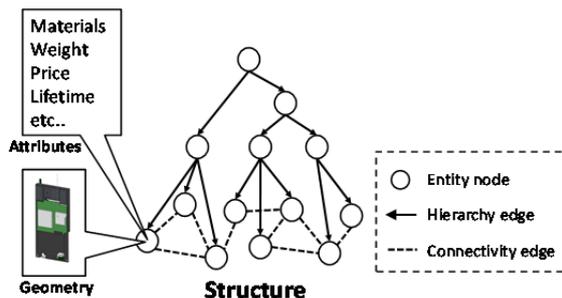


図2 製品モデル

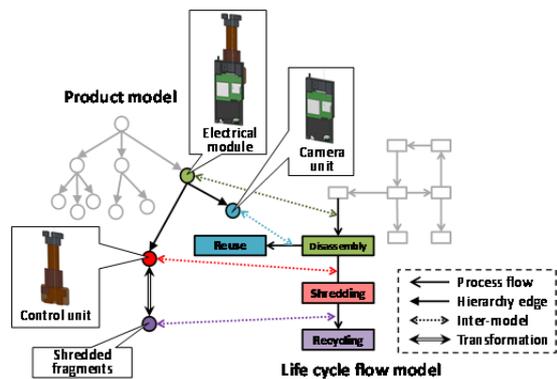


図3 製品モデルとライフサイクルモデルの統合

料の質量がプロセスの前後において保存されなければならないことを意味する。ただし、形状・属性値・重量の状態変化は許容するものとする。独立則とは、同一の部品や材料が分離・合成プロセスによって分岐した経路の両方を同時に経由することはないことを意味する。

排他則とは、ライフサイクルモデルの各エッジと対応付けられたノードは、それぞれ独立した部品を表現し、階層構造モデルにおいて親子関係にあるノードが同時に1つのエッジと対応付けられることはないことを意味する。

製品とライフサイクルの統合モデルにおいて、上記の3つの条件が満たされていないとき、例えば同一の部品が同時に異なるプロセスを流れている状態が発生するなど、2つのサブモデル間に物理的に実現不可能な矛盾が生じていることを意味しており、このような矛盾を含んだ構成をライフサイクルCADによって検出し回避できるようにした。

(4) 本研究で定義した製品ライフサイクルの統合モデルを用いて、ライフサイクルモデルと製品モデルとの間の整合性を以下の3つのレベルにおいて判断するシステムをライフサイクルCADのサブモジュールとして開発した。

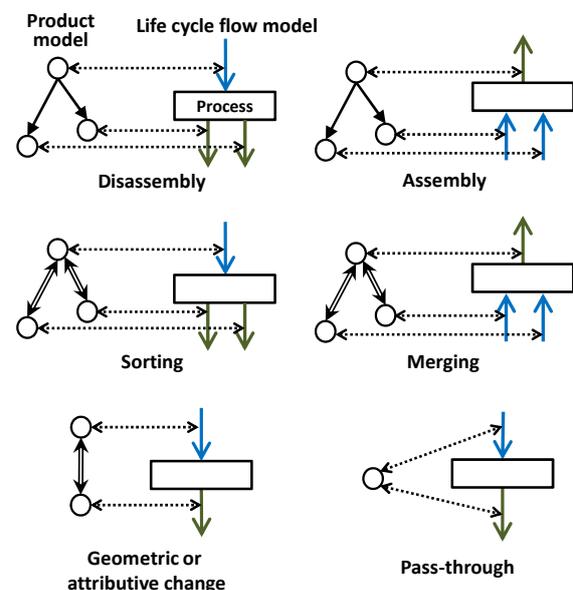


図4 モデル間接続の基本パターン

- I. トポロジーレベル
- II. 属性値レベル
- III. 形状レベル

トポロジーレベルの整合性とは、製品モデルとライフサイクルモデルの関係が、(3)項で述べた「保存則」「独立則」「排他則」の3つの条件を満たすかどうかによって判定されるものである。具体的には、ライフサイクルモデルと製品モデルを結ぶリンクの構造について図4に示す6つの基本パターンを定義し、これらのパターンの組み合わせによって2つのサブモデルが連結されているのであれば、トポロジーレベルの整合性を有しているものとする。すなわち、本研究は図4の各基本パターンの整合性を保証し、これらのパターンを組み合わせた製品ライフサイクルモデルのグラフ構造全体もまた整合性を有することを明らかにした。

図5は不整合の例である。例えば図5の左上は、あるプロセスを経由することによってオブジェクトの一部が失われてしまっている状態を表している。トポロジーレベルの不整合は、ライフサイクル設計の全ての過程においてライフサイクルCADによって常に監視し、設計者は不整合が解消されるまでモデルの修正を行うものとする。

属性値レベルの整合性とは、ライフサイクルモデルの各プロセスに記述された条件を、そのプロセスを通過するオブジェクトの属性値が満たすかどうかによって判定するものである。オブジェクトが満たすべき条件は、ライフサイクルシナリオの構成要素の一つである「シチュエーション」の表現形式によって必要に応じてライフサイクルモデルのプロセスに記述される。例えば「破碎プロセスに流入するオブジェクトには水銀が含まれていてはならない」といった属性値に関わる条件が各プロセスに設定され、製品、部品、材料の持つ属性値が満たすかどうかによってこれらの条件を整合性の判定を行う。このレベルIIの整合性を有しない場合は、ライフサイクルシナリオの実現性や実施効果が損なわれる可能性があることを意味する。

形状レベルの整合性とは、各オブジェクトの形状や配置が、ライフサイクルモデルの対応するプロセスに適しているかどうかによって判断するものである。例えば、製品のユーザによって交換されることを想定している消耗部品であれば、メンテナンスのプロセスにおいて容易に分

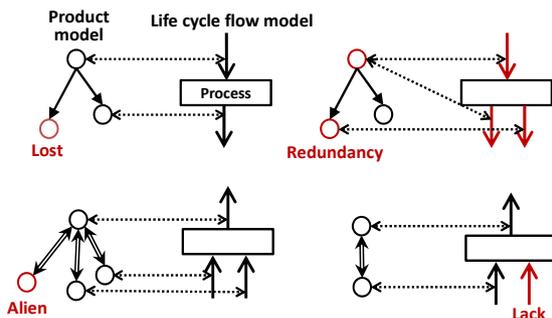


図5 トポロジーレベルの不整合の例

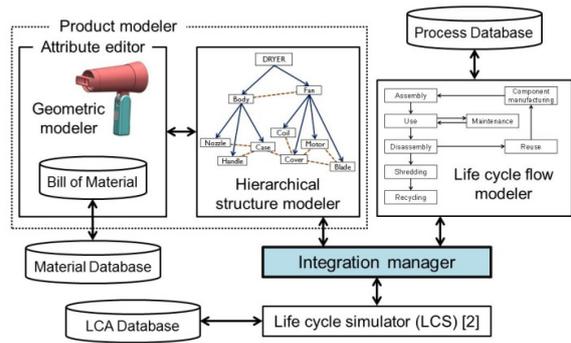


図6 ライフサイクルCADのシステム構成

離可能な配置や締結となっているかどうかを判断基準となる。

形状レベルの整合性については、ライフサイクルの各プロセスをいずれの部品がどのような構造・配置・属性値の状態で行われるかをライフサイクルCAD上で表示することによって、設計者の判断を支援する。

(5) 本研究で開発した、ライフサイクルCADシステムの構成を図6に示す。本システムは、シナリオ記述支援ツールを用いて作成されたライフサイクルシナリオを入力とし、ライフサイクルモデルを設計するためのフローモデラ、製品モデルを設計するための構造モデラ、属性値エディタ(形状モデラを含む)の3つのモデリングツール、および、製品モデルとライフサイクルモデルとを統合し、これら2つのモデル間の整合性を管理する統合マネージャ、2つのモデルの情報を用いて製品のライフサイクル全体における環境性と経済性を評価するためのLCSの2つのサブシステムから構成される。ただし、形状モデラには既存のソリッドモデラを拡張したものを用いた。また、本システムは、製品ライフサイクルの様々なプロセス情報を格納するプロセスデータベース、部品データや素材等の情報を格納するマテリアルデータベース、LCSによる環境性評価のためのLCAデータベースを持つ。また、属性値レベルの整合性判断を支援するため、混合リサイクルが可能素材の組み合わせや、有害物質の種類などに関する情報をプロセスデータベースに格納し、ライフサイクルモデルの各プロセスから参照可能にした。

(6) ライフサイクルCADを用いて、複数の工業製品(液晶テレビ、携帯電話、扇風機、ヘアドライヤー)を対象としたライフサイクル設計の試行を行い、提案した製品ライフサイクルモデルとライフサイクルCADシステムの有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Y. Matsuyama, S. Fukushige, and Y. Umeda, "Proposal of Life Cycle Planning Support

Method for Life Cycle CAD,” International Journal of CAD/CAM, Vol. 13, No.2, pp.73-79, 2014.

- ② Y. Umeda, S. Fukushige, T. Mizuno, and Y. Matsuyama, “Generating design alternatives for increasing recyclability of products,” CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 1, pp.135-138, 2013.
- ③ S. Fukushige, K. Yamamoto and Y. Umeda, “Lifecycle scenario design for product end-of-life strategy,” Journal of Remanufacturing, Springer Open Journal, Vol.2, No.1, 2012.
- ④ E. Kunii, T. Matsuura, S. Fukushige, and Y. Umeda, “Proposal of Consistency Management Method Between Product and its Life Cycle for Supporting Life Cycle Design,” Int. J. of Automation Technology, Vol.6, No.3, pp. 272-278, 2012.
- ⑤ Y. Umeda, S. Fukushige, E. Kunii, and Y. Matsuyama “LC-CAD: A CAD system for life cycle design,” CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.61, No.1, pp. 175-178, 2012.

[学会発表] (計 18 件)

- ① S. Fukushige, Y. Matsuyama, E. Kunii, and Y. Umeda, "Consistency Management System Between Product Design and The Lifecycle," ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE2013), August 4-7, 2013, Portland, Oregon, USA.
- ② S. Fukushige, T. Mizuno, Y. Matsuyama, E. Kunii, and Y. Umeda, “Quantitative Design Modification for the Recyclability of Products,” 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2013), April 17-19, 2013, Singapore.
- ③ Y. Matsuyama, E. Kunii, S. Fukushige, and Y. Umeda, “Proposal of Life Cycle Planning Support Method for Life Cycle CAD,” 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, Dec. 6-8, 2012, Niseko, Hokkaido, Japan.
- ④ S. Fukushige, Y. Matsuyama, E. Kunii, and Y. Umeda, “A Computational Design Environment for Product Lifecycle,” 2012 Asian Conference on Design and Digital Engineering, Dec. 6-8, 2012, Niseko, Hokkaido, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福重 真一 (FUKUSHIGE, Shinichi)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：10432527