

令和元年6月15日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14582

研究課題名(和文) Modelicaと機能モデリングを統合したシステム全体構成自動合成の研究開発

研究課題名(英文) Computational system synthesis integrated with Modelica and functional modeling

研究代表者

高本 仁志 (Komoto, Hitoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：30613244

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の1年目に、電力供給システムをモデル例としてModelicaによるシステム評価とその評価結果を踏まえた代替案生成方法を提案した。この結果は設計工学分野のJAMDSM誌に採択された。最終年度では、スマート製造システムを例として採用し、より広範にわたる構成要素や物理現象、その他の知識表現を扱うためのCDSの拡張を試みた。スマート製造システムが持つ機能を洗い出し、スマート製造システムの運用時の使われ方と各機能との関係を分析し、設備などの要素を組み合わせ、離散事象シミュレーションで実行可能なスマート製造システムモデルの構築に成功した(Procedia CIRP誌に採択)。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車などのメカトロニクス製品や自動車を作るための製造システムは、構成要素の複雑な相互作用により機能が実現されている。これらのシステムはモジュール化され、開発コストや開発時間を短縮に貢献している。システムの設計は様々なモジュールの組み合わせで実現されるが、その設計解の候補は多様である。本研究は、必要とされるモジュールを組み合わせ、組み合わせられた解をシミュレーションで評価する、という一連の手続きを開発したものであり、性能のよいシステムを体系的に設計するための基盤的な技術である。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a method to generate and evaluate alternatives of a system model defined with the accausal modeling principle. This study demonstrated the method in case of a system consisting of a variety of power plants that supply electricity under diverse supply and demand situations. The result has been published in JAMDSM international journal. Then, the method has been applied to system design of smart manufacturing systems. In this application, a smart manufacturing system is composed by a set of assets that interact one another in terms of message transfer and transportation of work pieces to be produced by the system. The model is used to generate discrete event simulation model for evaluation of the performance of the smart manufacturing system. The result has been accepted for publication in Procedia CIRP journal.

研究分野：設計工学

キーワード：モデルベース開発 設計支援 システム設計

## 1. 研究開始当初の背景

自動車などのメカトロニクス製品や自動車を作るための製造システムは、構成要素の複雑な相互作用により機能が実現されている。これらのシステムはモジュール化され、開発コストや開発時間を短縮に貢献している。システムの設計は様々なモジュールの組み合わせで実現されるが、その設計解の候補は多様である。本研究は、必要とされるモジュールを組み合わせ、組み合わせられた解をシミュレーションで評価する、という一連の手続きを開発したものであり、性能のよいシステムを体系的に設計するための基盤的な技術である。

## 2. 研究の目的

本研究は、人工知能など推論技術を適用した計算機援用設計技術を基礎として、様々な構成要素・物理法則を考慮しシステムの挙動を得る Modelica 技術と、システムが満たすべき機能という観点でユーザーニーズの論理構造を記述する機能モデリング技術とを統合し、これまでギアボックス等、構成要素の種類や支配的な物理法則が限定されたシステムの設計に特化した Computational Design Synthesis (CDS) の理論を拡張し、ハイブリッド自動車等の複雑なシステムの全体構成設計に適用可能な CDS を開発・体系化するものである。

## 3. 研究の方法

本研究のための計算機実験環境は3つのソフトウェア、(a)OpenModelica、(b)概念ネットワーク解析環境、(c)Mathematica で構成される。OpenModelica は、1,000 以上の検証された構成要素からなる標準ライブラリを持ち、自動車や風力発電システム等の全体構成記述から代数微分方程式を導き、数値解析を実行できる。研究代表者が開発した概念ネットワークの解析環境は、代数微分方程式の変数や定数、一般的な概念を表すシンボルで構成されるネットワークを可視化・解析でき、NaiveBayes 法や Logic-based Truth Maintenance System 等の機械学習機構と推論機構を備え、設計パラメータの関係性分析等での実績がある。本研究では、当解析環境を基盤に、概念モデルを可視化し設計解評価・代替案生成を実行するアルゴリズムを開発する。Mathematica は、離散数学分野の高度な関数（組合せ列挙、集合演算等）を実装しており、これを設計解評価・代替案生成アルゴリズムに組み込む。本研究では、Application Programming Interface(API)を用いて、ソフトウェア間の関数呼び出しや、モデルの受け渡しを行う。

上の実験環境を用いて、システムの全体構成、微分代数方程式、及びシステムの挙動に基づき計算機的に推論・評価可能な概念モデルの記述形式を研究・開発する。物理現象や制約条件を記述する箇所を微分代数方程式から抽出・パターン化し、それに対応する概念モデルの要素表現を定義する。抽出されたパターンと概念モデルの要素の組をライブラリ化し、設計解評価や代替案生成に用いる。特に、全体構成の空間的制約と挙動の時間的制約に関しては Interval Temporal Logic を応用した形式化を用いる。本研究では、システムの全体構成の設計が性能に大きな影響を与える（コージェネレーション設備を含む）ハイブリッドエネルギー供給システムのモデル化を実施。当モデルの構成要素は EU 研究開発プロジェクト ITEA が公開する検証済みの Modelica PowerSystem ライブラリに含まれる。これを用いて、様々な種類の発電・送電系を組み合わせ電力供給システムを構築し、数値解析により定量的な性能を計算できる。

次に、以下のステップからなる設計解評価・代替設計解合成アルゴリズムの開発に着手する  
1 (設計解評価): 概念モデルの各要素に関して、それぞれが期待する構造・挙動・変数間関係等のパターンがシステムの全体構成、微分代数方程式、システムの挙動から導かれるか否かを推論により評価する。  
2 (部分設計案抽出): この評価結果を向上させうる構成要素を Modelica PowerSystem ライブラリから抽出する。  
3 (設計解合成): システムの全体構成に加えらるる構成要素とその接続関係の可能な組み合わせを列挙し設計解群を作る。このフェーズでは、上記アルゴリズムにより幾つかの電力供給システムが生成され、電力需給バランス等の定量的性能が評価・比較可能であることを確認する。上記のアルゴリズムをその他の全体構成設計の事例に適用し高度化する。

## 4. 研究成果

第1の成果は、研究手法の項目で述べたハイブリッドエネルギー供給システムの設計を例とした代替案生成方法の提案である。この成果の詳細は JAMDSM 誌に記載されている。

Modelica のモデルは、システムの構成要素 (コンポーネント) が持つ Port 同士を接続することでシステムのモデルを構築する。本代替案の生成手法ではまず、任意の一時区間でおこる Modelica モデルの状態変化を分析し、Modelica モデルの構成要素が持つポートをノードとする有向グラフに変換する。次に、その有向グラフを分析して代替案を生成する。図1は Modelica のモデルと、ポートをノードとする有向グラフとの対応関係を示したものである。また、図2は事例研究で用いたハイブリッドエネルギー供給システムの構成、図3はこのシステムにあらわれる代表的なエネルギーの需要量と供給量の計算結果を示す。図4は図1の対応関係を用いて図2から得られた、ポートをノードとする有向グラフであり、Modelica モデルの構成要素の間でどのようにエネルギーが流れたのかを知ることができる。

図4を分析することにより、エネルギーの供給が足りない場所を特定でき、その場所に新たなエネルギー供給要素を Modelica ライブラリのモデルの中から選択し補うことで代替案を生成することができる。例えば、図2の赤い点線内にある風力発電機を加えた場合のシステムを構成する要素の間のエネルギーの需給関係を図5に示す。図3（当初の設計）と図5（代替案）を比較して分かる通り、代替案のほうが水力発電システムにかかる負荷を和らげることができる。

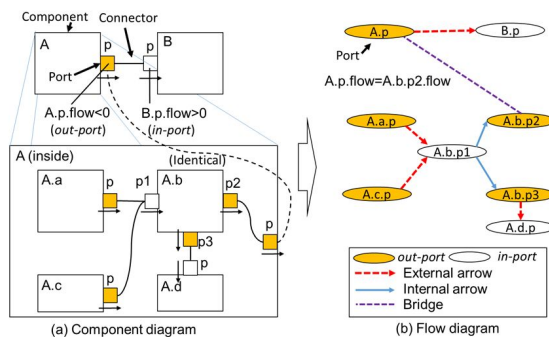


図1：Modelica モデルとポートをノードとする有向グラフの対応関係

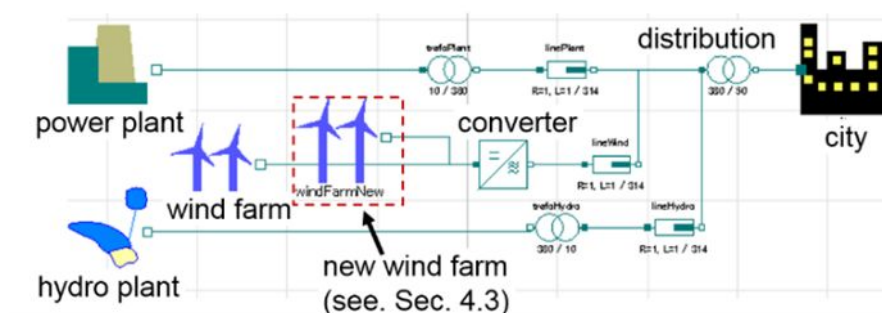


図2：ハイブリッドエネルギー供給システムの Modelica モデル

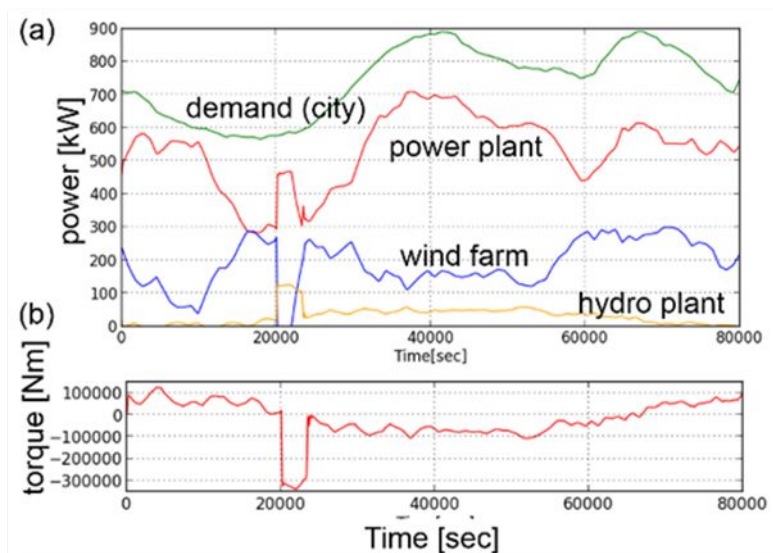


図3：システムを構成する要素の間のエネルギーの需給関係

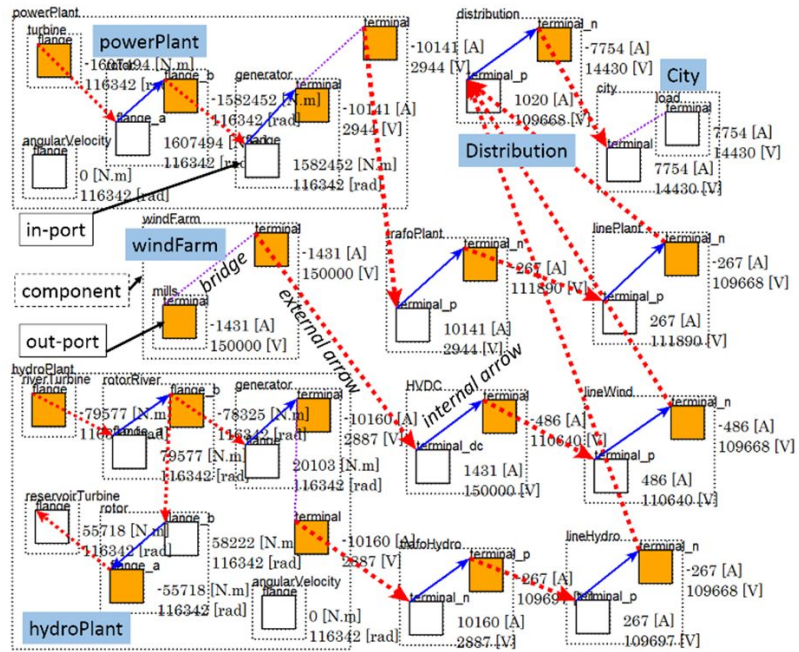


図4：ポートをノードとする有向グラフ

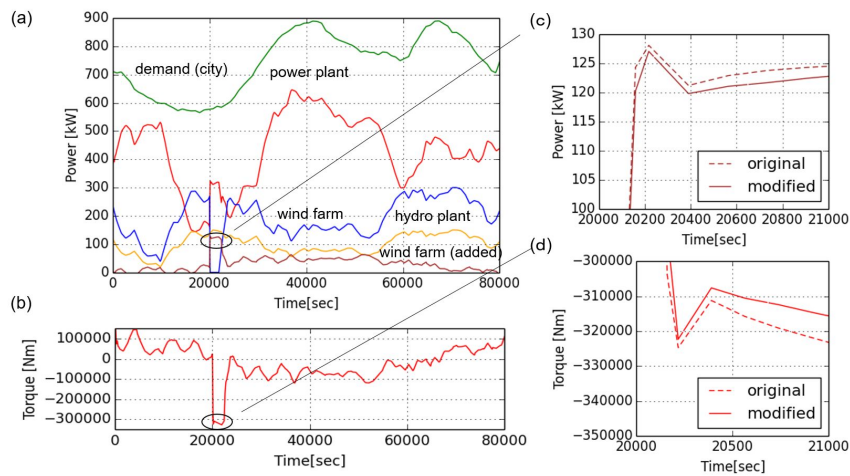


図5：新たに風力発電機を加えたシステムにおける構成要素間のエネルギーの需給関係

第2の成果は、スマート製造システムを例とした、より広範にわたる構成要素や物理現象、その他の知識表現を扱うためのCDSの拡張である。スマート製造システムが持つ機能を洗い出し、スマート製造システムの運用時の使われ方と各機能との関係を分析し、設備などの要素を組み合わせ、離散事象シミュレーションで実行可能なスマート製造システムモデルの構築に成功した。この結果はProcedia CIRP誌に採択された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

H. Komoto, S. Kondoh, K. Masui, Computation of flow diagrams of an acausal physical model and its application to hybrid power generation system design. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, vol.12, no.2, pp.JAMDSM0043, 2018, ISSN 1881-3054(Online).

H. Komoto, S. Kondoh, Y. Furukawa, H. Sawada, A simulation framework to analyze information flows in a smart factory with focus on run-time adaptability of machine tools. Procedia CIRP, 2019 (in press)

〔学会発表〕(計1件)

H. Komoto, S. Kondoh, Y. Furukawa, H. Sawada, A simulation framework to analyze information flows in a smart factory with focus on run-time adaptability of machine tools, the 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems on June 12-14, 2019 in Ljubljana, Slovenia.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6 . 研究組織

研究分担者、研究協力者なし。