

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820035

研究課題名(和文) 数値計算と定性推論を融合したモデルベース設計検証理論の研究

研究課題名(英文) Model based design and verification with qualitative reasoning and numerical simulation

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・製造技術研究部門・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) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：モデルベース開発とは、実機による検証試験のみに頼らず、製品のモデルを計算機上に構築し、それを用いて製品機能の検証を行う方法であり、自動車メーカーや航空機メーカーに導入されつつある。本研究の目的は、モデルベース開発における製品全体の挙動を理解するための方法論を研究するものである。本研究では、製品の定量的な挙動を導出する数値計算手法に加え、数値計算に用いられる微分代数方程式上の変数間の関係を用いて推論を行う定性推論手法を活用し、特徴的な変数の挙動を抽出し、複雑な製品の挙動を単純化させる手法を開発した。本研究の期間中、当手法をドライブラインモデルや風車システムモデルに適用し、機能検証を実施した。

研究成果の概要(英文)：Model-based product development is a means to verification of the functions of a product by building and simulating the corresponding product model without relying on experiments with prototype of the product. It is currently introduced in automotive and aerospace industry in the world. The objective of this research is to study a method to understand the behavior of a product in context of model-based product development. This research utilizes not only numerical simulation methods that generate quantitative behavior but also methods to utilize the relations among the parameters in the arithmetic differential equations that generate the quantitative behavior. By doing so, the designers were able to understand the behavior of a product with focusing on the behavior of the representative parameters, whose number is far less than the number of actual parameters. During the study period, we have published some articles in referred international journals and conference proceedings.

研究分野：設計工学

キーワード：設計工学 システムシミュレーション モデルベース設計 1Dシミュレーション モデリング シミュレーション 定性推論

## 1. 研究開始当初の背景

ハイブリッド自動車や医療機器など、様々なメカトロニクス製品が我々の生活を支えている。これら製品の要求機能や性能が高まるほど、その挙動や制御機構が複雑化する。故障がひとたび生じるとその原因究明は難しく、時に予期せぬ大惨事を招く場合がある。一方、製品開発プロセスでは、グローバル競争のもと開発期間・費用に対し厳しい制約が課せられており、機能・安全性の網羅的に検証することは難しい。そこで製造業界では、この制約下で高性能で安全な製品を市場に送り出すため、モデルベース開発に取り組んでいる。これは、製品の設計検証に、従来型の実機検証テストのみに頼らず、製品の計算モデルを積極的に用いる考え方であり、近年ではもはや、製造業界全体を席卷する標準的な製品開発プロセスであると認識されている。

モデルベース開発が実施される背景には、情報科学分野の様々な研究成果が基盤としてある。特筆すべきは、Paytner によるポンドグラフ理論 (Paytner, MIT Press, 1961) など、非因果的モデリング理論の構築である。これは、特定の物理現象を担う様々な構成要素の結合により、各要素の挙動を制約し (例: Kirchoff 則による要素間の電流や制約など)、系全体の挙動をあらゆる連立微分代数方程式を生成させるための理論である。この理論は、製品を構成する要素の様々な組み合わせを考慮するための直観的な手段を与え、製品の挙動に関する知識を様々な粒度の構成要素を単位として資産化できる。このため、製品開発過程に応用されることとなった。しかし、方程式系の数値解析で得られた挙動そのものは、各変数の断片的な情報であり、系全体の挙動を理解・検証するには不十分である。この点で、数値解析ソフトウェア Mathematica の開発者 Wolfram も、数値解析とモデル構築過程との連携を強化する必要性を指摘しており、非因果的モデリング環境 Systemmodeler を開発する契機となった。

さて、非因果的モデリングの研究は人工知能分野でも盛んに行われた。特筆すべきは、非因果的モデリング (デバイスオントロジー) に基づく定性的な挙動推論およびモデルベース故障診断技術の研究である [De Kleer et al., Artif Intell, 32(1), 97-130, 1987]。前者は、系の挙動をあらゆる方程式から変数間の関係を抽出し、制約伝播アルゴリズムを用いて各変数の定性値 (増加・変化なし・減少) の可能な組み合わせを網羅的に生成する。そして、その時間発展を系の挙動として導出する理論である。一方で後者は、正常な系の挙動と異常な挙動との違いを検知し、前述の定性推論手続を用いて異常な挙動の原因を構成要素の状態に求める理論である。製品開発プロセスに適用する際の問題点として、定性挙動生成時の組み合わせ爆発が現在の製品

の複雑化に対応できないことと、推論・診断結果に対しモデル構築に費用がかかりすぎることが挙げられる。

人工知能分野で発展したこれらの理論は、日本では 90 年代に設計工学分野に応用された。機能冗長型システムの設計方法論 [Umeda et al., AI EDAM, 10(4), 275-88, 1996] や工学知識統合モデリング環境 [Yoshioka et al., Adv Eng Inform, 18(2), 95-113, 2004] が顕著な研究成果である。本研究実施者はこれらの研究を発展させ、物理法則群を与える系の変数の依存関係と構成要素の接続関係を同時に詳細化する理論を提案し、その詳細化過程を再現するシステムを開発した。この成果として、設計・製造分野で最も権威のある学会誌、製造科学アカデミー (CIRP) 年鑑に関連研究成果が 2010 年から 3 年連続で採択された [Komoto et al., CIRP Ann-Manuf Techn, 61(1), 191-4, 2011 他]。本研究実施者は、挙動の数値解析を可能にする非因果的モデリング理論と定性的な挙動導出を行うための定性推論の融合により、設計者が描く製品の理想的挙動と開発途中である製品の実際の挙動とを比較し、その原因となる構成要素自身およびその関係性の再設計が可能であると考えた。このような両理論を融合し新たな知見を得るための研究は現状では行われていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、非因果的モデリングに関する上記研究を背景として、数値計算が与える定量的挙動と定性的挙動推論・故障診断アルゴリズムを応用し、製品設計段階における設計解の挙動検証を行うための理論を構築する。前述したように、両手法とも、挙動の推論・検証に関して特有の欠点を有する。本研究では両手法を融合しその欠点を互いに補完する理論を構築する。端的には、系の挙動導出に数値解析手法を用い、挙動導出における組み合わせ爆発を回避する。そして、数値解析結果と定性推論・故障診断アルゴリズムを応用し、挙動の高度な理解を実現させる。このために本研究では、定量的挙動の中で系の挙動を特徴づける知識を分類・抽出、そのうえで定性的な挙動の探索範囲を絞り込む。さらに、導出された挙動と設計者が意図する挙動情報と比較、再設計が検討される構成要素あるいは構成要素間の接続関係を特定する。本研究では、このための理論を数値解析・定性推論に関わる既存理論の上に構築し、その製品開発プロセスへの適用範囲と限界を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、数値解析・定性推論両手法を融合したモデルベース設計検証理論を構築し、その過程で、上記で説明した内容を明らかに

することを目標に、平成 26 年度、27 年度の 2 年間で以下の各年度 2 ステップからなる計画に従い研究を遂行する。

平成 26 年度は、まず、1) 非因果的モデリングを用いた製品モデルの記述、2) モデル記述から微分代数方程式系への変換、3) 数値解析を用いた挙動予測、4) 微分代数方程式系を含む定性情報の抽出、5) 定性的な挙動の推論、6) 目的挙動の定義という主機能を持つ計算機環境の構築を行う。機能 1 - 3 には、Maplesoft 社モデリング・シミュレーション環境 MapleSim (ライセンス取得済) を用いる。MapleSim は非因果的モデリング手法の一つである Modelica 言語が利用できる。MapleSim の代替案として、同じく Modelica 言語を利用できる Wolfram Research 社 SystemModeler をすでに準備している。機能 4、5 には SA-CAD を用いる [Komoto et al., Comput Aided Design, 44(10), 931-46, 2012]。SA-CAD は、工学知識に基づく統合設計環境 [Yoshioka et al. Adv Eng Inform, 18(2), 95-113, 2004] を基盤として本研究実施者が構築した、製品システムアーキテクチャー (SA) 設計環境であり、定性プロセス理論 [Forbus, Artif Intell, 24, 85-168, 1984] に基づく定性推論アルゴリズムを実装している。機能 6 は、オープンソース非因果的モデリング環境である JModelica を用いて実装する。

さらに、Jmodelica を用いて MapleSim と SA-CAD の入出力系を統合し、定量挙動と定性挙動を効率よく参照する環境を構築する。本研究実施者は JModelica を用いた研究実績がある。具体的には、Modelica 言語で結合関係が定義された製品モデルから、製品の変数とその依存関係を可視化するプログラムを開発済みである [高本他, 精密工学会秋季大会, 2013]。

次に、設計検証の対象となる製品を非因果的モデリングに従って構築する。同時に、数値計算が問題なく実行可能なプログラムを開発する。また、数値計算の前提となる微分代数方程式系の変数間の比例・微分関係など、定性推論の諸入力抽出できるプログラムを開発する。設計対象として、自動車動力系全体とその部分として直流モータとを採用する。直流モータは比較的小規模で開発プログラムの修正点が容易である。また、自動車動力系全体は実際の製品開発上流での使用に要求される規模のものを採用する。直流モータモデルの作成には Modelica Standard Library を用いる。また、限られた研究期間を研究環境の準備ではなく研究の実施に充てるため、自動車モデルの構築には MapleSim のモデルライブラリの一つである Driveline Library を用いる。その後、JModelica 上で設計者が意図する挙動を記述する環境を整える。この結果、設計者が意図する挙動と、SA-CAD と MapleSim で生成された定性・定量挙動情報との比較解析が可能となる。

平成 27 年度は、初年度で開発した計算機環境を用い、計算機が導出する定量・定性的挙動に基づき設計者が意図する挙動からその原因となる構成要素を推定する、本研究の核となる理論の構築を行う。このために、以下 4 つの部分的な計算機的手続きを検討する。これらは、1) 定量的挙動の中で系の挙動を特徴づける各変数の極値などの情報を抽出する手続き。2) 定性的な挙動の探索範囲を 1 の結果により絞り込む手続き。3) 1 と 2 で得られた情報を設計者が意図する挙動情報と比較するための手続き。4) 3 の結果から再設計が検討されるべき構成要素あるいは構成要素間の接続関係を特定する手続き、である。これらの手続きには様々な実装が考えられるため、導出された再設計箇所の信頼性と導出にかかる計算量を評価指標として適切な実装を選択する。また、理論を再現する手続きを効率よく実装するための助言を適宜受ける。KIEF の構築実績を持つ北海道大学吉岡真治准教授、定性推論を設計工学分野に応用した草分けの英 Cranfield 大学 富山哲男教授等の助言を得る。

最終年度には、本研究の成果を振り返る。本研究が提案する理論・計算機環境が妥当であれば、本研究に、助言者を共同研究者として加えより大規模な研究へと発展させる。

#### 4. 研究成果

本研究の期間中、当手法をドライバインモデルのみでなく、風車システムモデルにも適用し、その機能検証を実施した。いかに記した学術論文や学会発表などを通じて当手法の成果発表を行った。また、国内外のモデルベース開発の研究者を訪問し、本研究成果の今後の応用方法等に関して有益な意見を得ることができた。研究成果の詳細に関しては、発表論文に記載される通りである。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

H. Komoto, K. Masui, Classification of design parameter with system modelling and simulation techniques, CIRP Annals - Manufacturing Technology -, 査読有、63(1)、2014、pp.193-196  
DOI: 10.1016/j.cirp.201403.098

H. Komoto, S. Kondoh, K. Masui, A. Tezuka, Parameter-based visualization of a Modelica model with a numerical data integration feature, Procedia CIRP, 査読有、21、2014、pp.40-45  
DOI: 10.1016/j.procir.

H. Komoto, S. Kondoh, K. Masui, A. Tezuka, A state reduction approach to interpretation of system behavior based on system simulation, Journal of Industrial and Production Engineering, 査読有、32、2015、pp.442-448

DOI: 10.1080/21681015.2015.1061059  
H.Komoto、S.Kondoh、K.Masui、An  
application of graph traversal  
algorithm to design task planning in  
model-based product development、  
Journal of Advanced Mechanical Design、  
Systems、and Manufacturing、査読有、  
in press、2016

[学会発表](計 1 件)

H.Komoto, S.Kondoh, K.Masui、A survey  
of approaches to design and diagnosis  
of complex engineered systems with  
system simulation and qualitative  
reasoning、Asian Conference on Design  
and Digital Engineering Journal of  
Industrial and Production Engineering、  
査読有、2015.10.4-6、Kitakyushu( Japan )

## 6 . 研究組織

### (1)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・製  
造技術研究部門・主任研究員  
研究者番号：26820035