システムシミュレーションを用いた製品開発における
パラメータの分類とパラメータ関係の可視化高本 仁志^{*1}, 増井 慶次郎^{*1}, 近藤 伸亮^{*1}, 手塚 明^{*2}A study of parameter classification and relation visualization methods in product development
with system simulationHitoshi KOMOTO^{*1}, Keijiro MASUI^{*1}, Shinsuke KONDOH^{*1} and Akira TEZUKA^{*2}^{*1} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Advanced Manufacturing Research Institute
1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8564, Japan^{*2} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Research Center for Ubiquitous MEMS and Micro Engineering
1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8564, Japan

Received 15 May 2014

Abstract

System modeling and simulation technique is aimed at the support of model-based product development. Although the technique supports analysis of systems with numerical simulation, it does not support design processes at the early stage of product development. In order to utilize the functions of system modeling and simulation techniques at the early stage of model-based product development, the paper proposes methods to analyze and visualize the parameter network of a product model, which is derived from physical phenomena that jointly construct an equation system for numerical simulation representing the model behavior. The paper also presents a method to classify simulation variables in the parameter network based on its network structure and the results of numerical simulation processed with a machine learning technique. The presented methods are demonstrated using a simple electric vehicle model described with the Modelica language.

Key words : Product development, System simulation

1. 緒 言

ハイブリッド自動車, 風力発電機, 医療機器などメカトロニクス製品の開発過程には, 様々な分野の技術者が携わっている. この過程で考慮される製品の要求仕様及び構成要素やその相互作用により生じる物理現象は膨大かつ多様であり, 設計意図や設計情報を技術者間で活用・共有することは難しい.

モデルベース設計 (Model Based Design) とは, 製品の機能・挙動・構造を理解するために, 様々な工学領域のモデリング・シミュレーション手法を用い, 設計情報を効率よく評価・管理・共有する製品開発アプローチである (Basten, et al., 2013). モデルベース設計の導入により, 様々な工学領域の技術者が設計情報を理解・共有・再利用でき, この結果, 製品開発にかかる期間・コストを短縮・減少できると期待される.

モデルベース設計は様々な構成要素のモデルが利用可能な製品開発後期に導入され易く, その場合, 製品全体の挙動検証等に主に用いられる (Verein Deutscher Ingenieure, 2004). 近年, モデルベース設計を製品開発初期に導入することが求められている (羽藤, 大富, 2012). この理由の一つは, 設計の自由度が高いこの期間で全体最適を行うために, 多数の設計解を効率よく比較検討されるからである. この期間で扱う設計問題は, 特定の工学領域に定められない設計問題を特定の工学領域に関する部分問題に分割する, という特徴を持つ (D'Amelio, et al., 2007).

No. 14-00261 [DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0334]

^{*1} 正員, (独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 (〒305-8564 茨城県つくば市並木 1-2-1)^{*2} 正員, (独) 産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター

E-mail of corresponding author: h.komoto@aist.go.jp

この設計問題の特徴から、特定の工学領域に依存しないシステムモデリング・シミュレーション手法（例えば Modelica 言語等(Modelica, 2012)）が基盤技術として注目を集めている。この手法は商用(OpenModelica, 2013, etc.)及びパブリックドメイン(MapleSim, 2012; 20Sim, 2013, etc.)のソフトウェアとして実装され、欧米の自動車業界などで用いられている。

図1に示すように、システムモデリング・シミュレーション手法は、製品の定量的振舞いを計算する機能、このための数理モデルを製品構造に基づき構築する機能、計算結果の解析を支援する機能（可視化機能等）を実現し設計プロセスを支援する。しかしながら、これらの機能のみでは製品開発初期における設計プロセスを十分に支援できない。その理由は第一に、製品開発初期では構造を決定する際、機能の階層的分解や機能と物理現象との対応付け、機能要求と設計パラメータの対応付け等の意思決定も並行して行われるからである。このため、注目すべき視点や知識操作に応じて様々な工学オントロジーや統合モデリング環境を用いる必要がある(来村, 2004 ; Yoshioka, et al., 2004 ; Komoto and Tomiyama, 2012)。例えば、この手法は、製品の構造を構成要素とその接続関係として表現するためにデバイスオントロジー(de Kleer and Brown, 1984)を採用している。これに並行して、設計意図や要求などを物理現象や機能に関して明示したうえで設計を進めていくために、プロセスオントロジー(Forbus, 1984)や機能モデリング(Umeda, et al., 1996)などを用いることが望ましいと考えられる。第二に、計算結果として得られる製品の定量的振舞いを、設計の観点から有用な形で可視化・解析するための機能が備わっていないからである。例えば、デバイスオントロジーは、振舞いを計算するための方程式内のパラメータ群やそれらと関係づける物理現象・制約条件などを明示せず、これらに注目した設計解の解析や改善案の提案を支援できない。

Fig. 1 A design process supported by system modeling and simulation software. Although the software supports modeling with device ontology and analysis of numerical system behavior, it does not sufficiently support modeling with various knowledge representations and analysis of simulation results with consideration of design aspects.

本稿では、システムモデリング・シミュレーション手法を製品開発初期の設計プロセスに適用する一例として、方程式系の構造や数値計算結果から得られるパラメータの関係性を可視化・解析する手法を提案する。Axiomatic Design (Suh, 2005)や Design Structure Matrix (Eppinger, et al., 1994)のように、要求機能と設計パラメータあるいは構成要素・設計タスクの構造（順序）の関係を可視化・解析・最適化する研究は既に行われている。しかしながら、既存手法は、これら関係の有無のみを用いており、関係が持つ意味（パラメータを変化させる物理現象等）は捨象される。既存手法によりグラフ理論に基づく簡便な関係ネットワークの解析が可能であるが、設計初期段階での物理現象に関わる推論（考慮する物理現象が妥当であるかどうか等）を十分に支援するには、物理現象を扱うモデルが必要となる。本稿では、システムシミュレーションを行うために構成される方程式や条件文などの構造的関係のみでなく、各方程式の内容やパラメータの振舞いなどにも注目して、パラメータ関係の可視化・解析・分類を行う手法を提案する。

本稿の構成は以下の通りである。第1章では本研究の背景と目的を述べた。第2章では、システムモデリング・シミュレーション手法で採用されており、モデルベース設計の基礎となるデバイスオントロジーとその一例である Modelica 言語を紹介する。第3章では、Modelica 言語で記述されたモデルを入力として得られる方程式系の構造や数値計算結果を用いてパラメータの関係性を可視化・解析・分類する手法を提案する。第4章では本研究で提案した手法の今後の展開と結論を述べる。

2. システムモデリング・シミュレーションを活用したモデルベース設計

2.1 デバイスオントロジー

デバイスオントロジーは、構成要素 (device) とその接続関係による製品の表現形式である (de Kleer and Brown, 1984). 構成要素は複数の接続端子 (terminal) を持つ. 接続端子同士は導管 (conduit) によって接続され, 構成要素の関係が定義される. また, 記述される製品に粒度を与えるために構成要素の階層を定義できる. 構成要素とその属性, 接続端子の種類等は, 構成要素ライブラリによって定められている. デバイスオントロジーに基づくモデリング言語の例として, Modelica 言語や, 定性推論を行うための言語 (de Kleer and Brown, 1984), MATLAB/Simulink 上で用いられるモデリング言語 (Simscape, 2013) 等がある. 図 2 は, この中の一つの Modelica 言語を用いて, 第 3 章で用いる電気自動車の簡易モデルを記述したものである.

デバイスオントロジーは, 構成要素間の因果関係は明示的に記述しない非因果的モデリング (Acausal model) に用いられる知識表現である. これは, 構成要素間の情報やエネルギー等の流れを明示化する因果的モデリング (Causal modeling) とは異なる. 製品設計において, デバイスオントロジーは構成要素とその接続関係に関して設計解 (製品モデル) を表現できる. しかし, 構成要素内や構成要素間で生じる物理現象やその結果として生じる構成要素の状態変化は明示されない. また, 物理現象などで表現される構成要素内・構成要素間のパラメータ関係も明示されない.

Fig. 2 A simple electric vehicle model described with device ontology (excluding connections with arrows, which represent information flows). The model consists of devices, terminals, and conduits. The model does not display the parameters of the components and their relations. Thus, design variances are described in terms of variations on the connections, but not explicitly with relations among the parameters.

2.2 Modelica 言語とシステムシミュレーション

Modelica 言語は欧州の大学及び研究所が開発するデバイスオントロジーに基づくモデリング言語である (Fritzson, 2011; Modelica 2012). デバイスオントロジーで定義された「構成要素・接続端子・導管」は, Modelica 言語では「component・pin・connector」と呼ばれる (図 2 参照). 構成要素は任意の数のパラメータとパラメータ関係 (方程式等) を含む. 構成要素の接続端子は, 構成要素が属する物理領域 (電気系・回転運動系等) が定める non-flow 変数と flow 変数を持つ. 導管によって接続端子が接続されることで, これらの変数は「等値接続 (equality coupling)」と「ゼロ総和接続 (sum-to-zero coupling)」という制約で束縛される. 例えば, 電気自動車を駆動するモータ内の抵抗やインダクタンスを持つ接続端子は, non-flow 変数として電圧 v , flow 変数として電流 i を持つ. これらが接続されると, 両接続端子の電圧の値は等しくなり (等値接続), 一方の接続端子からの電流の流入量が他方の端子への流出量に等しくなる (ゼロ総和接続).

Modelica Standard Library (MSL) は, Modelica 言語で記述された定数や単位, 機械要素や電気回路素子などの基本的な構成要素をまとめたライブラリである. 構成要素内に定義されたパラメータ関係はこのライブラリに定義されている. 現在, MSL Version 3.2 が公開されており, 様々な工学領域で使用可能な 1000 個以上の構成要素が含まれる. MSL のソースコードは無償で利用・拡張できる. Modelica 言語では, 構成要素間の接続関係が各構成要素の変数の制約条件に変換され, モデルの挙動を示す方程式群の生成に用いられる. 方程式群に含まれる変数の初期値などが与えられた後, Modelica コンパイラが数値解析プログラムを生成し, モデルの挙動が計算される.

3. システムシミュレーションの挙動の可視化とパラメータの分類

本章では, Modelica 言語で記述した複数の構成要素からなるモデルを, 構成要素のパラメータ及びその関係性の観点から可視化・解析する手法を, 簡単な電気自動車のモデル (図 2) を例として紹介する. このモデルは, 永久磁石を用いた DC モータで駆動し減速後の回転速度を取得してトルクを制御する機構を持つ. このモデルは著者らが MapleSim (MapleSim, 2012) 上で, Modelica 言語の MSL Version 3.2 に収められている構成要素のみを用いて構築したものである. このモデルに関しては文献 (廣田, 小笠原, 2010) を参考にした. また, MapleSim で記述されたより複雑なモデルは文献 (Komoto and Masui, 2014) を参照いただきたい.

図 3 はこのモデルに用いられた知識表現を示す. 図 3(a-d)はそれぞれ, (a)構成要素は階層構造を持つ, (b)任意の 2 つの構成要素が接続される, (c)構成要素は任意の数のパラメータを持つ, (d)任意の数のパラメータが関係づけられることを示す. このうち(a, b)がデバイスオントロジーによって表現される. 図 2 のモデルの記述にはこのうち図 3(b)の知識が用いられている.

MapleSim 上で図 3 の知識表現に従い記述されたモデルは JModelica 上で数式処理が行われ, その挙動が計算される. 構成要素のパラメータとその関係性を可視化・解析する計算機環境は図 3(a, b-d)の知識を明示している. 本章では, この計算機環境を用いて, 可視化・解析手法を説明する. この計算機環境の構成に関しては文献 (高本他, 2013) にも紹介がある.

Fig. 3 Knowledge representation used for visualization and analysis of a product model developed with system modeling and simulation software.

3・1 パラメータ関係の表現

図 4 は, 図 2 で示した電気自動車の簡易モデルをパラメータ関係の観点から可視化したものである. 構成要素 (Component) は図 4 上の黒枠で表され, その包含関係が構成要素の階層を示す. 構成要素の名前は黒枠の左上に表示されている. これは, 図 2 が示す構成要素名に対応する. パラメータ関係の全体像は, 丸型ノードで表現されるパラメータ (Parameter) とひし形ノードで表現される関係 (Relation) が構成する有向グラフである. JModelica が処理する一つの方程式が一つの Relation に対応しており, それが含む Parameter への有向リンクを持つ. 図 4 の Parameter の色は 3.2 節で説明する分類を示している.

図 4 で示されるモデルは, MapleSim 上のモデルと構成要素ライブラリから, Component とそれが持つ Parameter と Relation を取得し統合することで得られる. 図 4 では, モデルの挙動には関係ない Parameter は除外されている. 図 4 の構成要素の位置は, 図 2 上の構成要素の位置に応じて自動的に決定される. (構成要素の重なり合いをなくすための微調整は筆者らが行った.)

Fig. 4 (a) The same electric vehicle model shown in Fig. 2 but visualized from the perspective of parameters (circles) and their relations (diamonds). The positions of components correspond to those in Fig. 1. The color of parameters corresponds to the type of parameters, which is explained in Section 3.2. Fig. 4 (b) and (c) show partial models enlarged for visualizing the detailed mathematical expression of the relations Rel1-4 and Rel5, respectively.

3・2 パラメータ関係の構造的解析に基づくパラメータ分類

Parameter は、Constant と Variable に分類される。Constant は、数値計算の定数入力となる Parameter である (図 4 では緑色)。Variable とは、モデルの挙動を表現するために数値計算の結果その値が変化する Parameter である。Variable はさらに、この分類を所与としモデルを分析することで、以下のように分類できる。

- Input variable : 数値計算時に、他の Parameter の値の変化の影響を受けない Variable であり、関係する Parameter がすべて Constant であることから識別できる。例えば、図 4(b)にあるように、実測値と目標値との差を計算する関数 F1 の入力である $F1.u2$ は、目標値 $S1.offset$ と $F1.u1 = S1.offset$ という方程式により関係づけられる。この方程式はモデル上の Relation の一つである Rel1 の詳細に記述されている。このとき、 $S1.offset$ が Constant であるため、 $S1.offset$ は Input variable であると識別される (図 4 ではピンク色)。
- Sub input variable : Input variable の影響のみを受ける Variable である。この例では、 $F1.u2$ を含む関係は全て少なくとも二つ以上の Variable を含んでいることから識別できる。これらは相互に依存しており、 $F1.u2$ の値のみに依存しない。(この例は Sub input variable を含まない。)
- Output variable : その値が他の Variable の値に影響を与えない Variable である。この例では、抵抗要素 ra が持つ $ra.LossPower$ が Output variable に相当する。図 4(c)上の Relation の一つである Rel5 にあるように、 $ra.LossPower$ は $ra.v$ と $la.i$ という二つの Variable の積で定められる。(この因果関係は Input variable と Constant から順番に決定する Variable を探索することで得られる)。しかしながら、 $ra.LossPower$ 自体は他の Variable の値に影響を与えないため、Output variable となる (図 4 では青色)。
- Computation variable: 上記のどれにも属さない Variable であり、モデルの挙動を計算するために不可欠な Parameter である (図 4 では緑色)。

以上のようなパラメータ同士の依存関係を有向グラフで表現しその構造を解析することで、挙動計算の可解性判定や計算過程の分割や順序付けを行うことができる(伊理他, 1982; 室田, 伊理, 1983). 同様に、これらの分類は、製品開発初期に携わる設計技術者にとっても、モデルに含まれる物理現象を理解し、そのうち相互依存性がない部分を効果的に取り除き、モデルを単純化する場合などに有効であると考えられる。

3・3 パラメータ関係の構造的探索に基づく設計パラメータの探索

計算される製品モデルの挙動は、Variable に分類される Parameter の値の変化により表現される。この挙動は Constant に分類される Parameter の値と、構成要素の接続関係に由来するパラメータ関係により決定される。構成要素の接続関係が所与の場合の設計課題は、要求される挙動を満たすように Constant に分類される Parameter の値を決定することであるので、これらの Parameter が設計パラメータであると考えられる。潜在的な設計パラメータの数は膨大であり、要求される挙動に対し考慮すべき設計パラメータを選択する作業が必要となる。また構成要素の接続関係を決定することが設計課題となる場合、これにより要求される挙動と設計パラメータを関係づける物理現象を明らかにする必要がある。

本研究では、要求される挙動に関わる Variable を入力として他の Variable を辿りながら設計パラメータを探索し、入力と各設計パラメータを接続する最短経路群を出力するプログラムを作成した。この探索手続きは幅優先探索で行い、探索を制限する閾値として最大探索深さを用いる。図5は、電気自動車の重心の位置を示す Variable である M1.s を入力とした場合の探索結果として得られた最短経路群のうちの M1.s から車輪の半径 IRW1.radius, シャフトの完成モーメント I1.J, 制御機構の比例ゲイン PID1.Gain.k という3つの設計パラメータへの最短経路の一つをそれぞれ可視化したものである。図5内のテキストは、これらの経路のうち M1.s から IRW1.radius への経路を挙動の計算に用いられる方程式に関して示したものである。このような探索・可視化手法は上にあげた設計課題を効率よく行うために有効であると考えられる。

Fig. 5 Visualization of the minimum paths between a Variable representing the vehicle behavior (M1.s) and three design parameters (Constants) (IRW1.radius, I1.J, and PID1.Gain.k). The text shows the equations on the paths between M1.s and IRW1.radius, which are used for numerical calculation of the vehicle behavior.

3・4 パラメータ配置最適化の一例

モデル上の Component の数が増えるほど Parameter と Relation をノードとするグラフ構造は複雑になるため、できるだけ見やすいようにこれらのノードを配置する必要性が高まる。図 3(a)と図 3(c)の関係が示すように、

Component の階層構造と Component と Parameter との関係から、モデル全体を表現する Component を根としたツリー構造が構成される。これをもとに Component の中心座標と Parameter の座標を決定する最適化手続きを以下に示す。

まず、Component と Parameter の座標を決定するために、ツリー構造を 2 次元配置する際に用いられる Tree Mapping Algorithm (Schneiderman and Plaisant, 2013) を応用した。この手続きは、ツリー構造上で同じ親を持つ Component 及び Parameter の探索順序（次段落の例で説明）を入力とする。この手続きの結果得られた Component と Parameter の座標を基に Relation の座標を決定する。ここでは、Relation の座標はそれが含む Parameter 群の重心とした。最適化手続きでは、このツリー構造の探索順序を最適化パラメータとし、Relation と Parameter を結ぶ全ての辺の長さの和を、最小化されるべき効用 C (式 1 参照) とした。最適化手続きには焼き鈍し法を適用した。

$$C = \sum_{i=1}^{n_R} \sum_{j=1}^{n_P} k_{ij} \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

ここで、 n_R および n_P はモデル上の Relation と Parameter の総数、 x と y は各ノードの座標である。また k_{ij} の値は、 i 番目の Relation から j 番目の Parameter への有向リンクが存在する場合に 1 であり、それ以外は 0 である。

図 6 は図 5 に含まれるモデル要素の配置を、上記手続きにより最適化したものである。(焼き鈍し法は発見的最適化手法であり、この配置が最小の効用を与える保証はない。) 最適パラメータであるツリー構造の探索順序は、図 6 の場合、一番左側の縦長に配置された airGapDC が先頭であり、次に隣の Drag, Ia, PID1 と続く。(仮に、探索順序の最初が PID1 であれば、PID1 が一番左側に配置される。) 次の I1 の配置は、余白の割合が垂直方向よりも水平方向が小さくなるため、横長の配置となった。ツリー構造上で airGapDC の直下に位置する要素は flange, pin_ap の順に探索・配置された。

Modelica 言語で記述されたモデルとの対応関係が失われてしまうものの、図 2 と図 6 との比較でわかるように、Component と Parameter を見通し良く分布させることが可能となった。

Fig. 6 An optimized layout of the electric vehicle model shown in Fig. 5. Fig. 6 shows the calculated paths described in Section 3.4. Although the layout in Fig. 6 is not consistent with the layout in Fig. 2, the components and their parameters are reasonably distributed for user-friendly visualization.

3・5 挙動の計算結果を用いたパラメータ関係の分類

製品モデルの挙動は数値計算の結果得られる各 Variable の値の時系列変化である。本研究では、製品モデルの挙動をいくつかの代表的な挙動の集まりとして理解するために、各 Variable を挙動の類似性に関して分類した。本研究では、各 Variable の時系列変化を示すイメージ（2次元プロット）を作成し、各イメージを標本とした主成分分析（日本機械学会，2007）を行い、Variable 同士が比較可能な特徴量 V を求めた。具体的には以下の手続きを行った。

1. 数値計算で得られた各 Variable の値の時系列変化を等時間間隔で抽出し、時間と値で構成される $2 \times n$ 行列をそれぞれ生成する（ n は抽出要素数）。
2. 時間と値の最小値と最大値を 0 と 1 とする様、各行列要素の時間と値を正規化する。
3. 正規化された行列を用いて、図 7 の各 Variable の右下にあるイメージ（2次元プロット）を作成する。
4. このイメージの要素（本稿では縦 100，横 100，計 10,000 要素）から Variable の値の有無を 2 値判定し、その判定結果を要素とするベクトルを標本として生成する（本稿では、1 か 0 を要素してもつ 10,000 次元のベクトルとなる）。
5. 各 Variable に対応する標本で構成されたベクトルの共分散行列を求め、その固有ベクトルを計算する。
6. 上位 5 つの固有値に対応する固有ベクトルを基底として、各 Variable に対応する標本を射影したものを各 Variable の特徴量 V とする。

二つの Variable (i および j) 間の距離 $d(i, j)$ は、対応する特徴量 V の距離として以下のように定義した。

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^5 (V(j)_k - V(i)_k)^2} \quad (2)$$

例えば、計算区間内において各時間で両パラメータの値が比例関係を持つと距離は 0 となる。各 Variable の分類には、この距離と分類数を所与とする K 平均法を用いた (Bishop, 2007)。分類数を所与とせず、同一分類に属する Variable のばらつきの許容（最大）値を閾値として、分類数を定めることもできる。許容値を 0 とすれば（数値誤差がなければ）ある分類に属する Variable は計算区間内で正規化された際に互いに比例関係を持つと考えられる。

図 7 は電気自動車モデルの各 Variable を、所属する構成要素と挙動に関する分類に関して再配置したものである。同じ Component に属する Variable は同じ列に配置し、同じ挙動分類に属する Variable は同じ行に配置される。（数値計算の対象ではない Constant（図 7 では、オレンジ色のノードである）は数値計算中一定の値を持つので、一つの行にまとめて配置される。）図 7 では、各 Variable の右下に数値計算結果、その左上に所属を表示した。

任意の 2 つの Variable の関係は、2 つを関係づける方程式を辿ることにより詳細に理解することができる。例えば、図 7 に示す通り、制御機構へのフィードバック $F1.u2$ と電気自動車の中心の位置 $M1.s$ を関係づける最短経路は 2 つ存在し、それぞれ 2 つの Parameter (Variable 或いは Constant) と 3 つの方程式を介している。経路[1]では、(1)から、その中心の加速度 $M1.a$ は $F1.u2$ の微分と比例し、その係数は車輪の半径 $IRW1.radius$ である。また、(2) から、 $IRW1.radius$ を係数として、車輪円周の移動量 $IRW1.frangeT.s$ と減速機の回転量 $IG1.flange_b.phi$ とが比例関係にあることがわかる（ $IRW1.fixedR.phi0$ と $IRW.fixedT.s0$ は初期値を示す Constant である）。最後に、(3)から、 $IRW1.frangeT.s$ にその長さの半分を加えたものが $M1.s$ であることがわかる。経路[2]では、3 つの方程式のうち、(1)のみが経路[1]と異なり、(1)は、減速機の回転量 $IG1.flange_b.phi$ の微分が $F1.u2$ となることを示している。ここで明らかになる微分関係は、この 2 つの Variable の関係を示すのみでなく、2 つの Variable の所属間に関係に拡張され、グループ 4 に属する Variable の微分がグループ 2 に属する Variable の値に比例する、と解釈される。

上記の分類手法は、挙動を記述するパラメータの数が大きいシステムの挙動をいくつかの代表的な挙動に分類し、パラメータ間の関係を一般化して分類間の関係を得るためのものであり、設計者が大規模なシステムの挙動を理解するために有効であると考えられる。

- D'Amelio, V., ElMaragh, W., Tomiyama, T. and Urbanic, J., Complexity of multi-disciplinary design, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.56, No.1 (2007), pp.185-188.
- de Kleer, J. and Brown, J. S., A qualitative physics based on confluences, Artificial Intelligence, Vol.24, No.1-3 (1984), pp.7-83.
- Eppinger, S. D., Gebala, D., Smith, R. and Whitney, D. E., A model-based method for organizing tasks in product development, Research in Engineering Design, Vol 6, No.1 (1994), pp.1–13.
- Forbus, K.D., Qualitative process theory, Artificial Intelligence, Vol.24 (1984), pp.85-168.
- Fritzon P., Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with modelica (2011), IEEE.
- 羽藤武宏, 大富浩一, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビュー, Vol.67, No.7 (2012), pp.7-10.
- 廣田幸嗣, 小笠原悟司, 電気自動車工学 - EV 設計とシステムインテグレーションの基礎 (2010), 森北出版
- 伊理正夫, 恒川純吉, 室田一雄, グラフ論的手法による大規模連立方程式の構造的可解性判定とブロック三角化, 情報処理学会論文誌, Vol.23, No.1 (1982), pp.88-95.
- 日本機械学会, 機械工学便覧, 基礎編 α 7—51 (2007), 日本機械学会.
- JModelica, Open source Modelica platform for modeling, simulation and optimization, version 1.11, Modelon AB (2013).
- 来村徳信, 工学ドメインオントロジー, 人工知能学会誌 Vol.19, No.2 (2004), pp.179-186.
- 高本仁志, 増井慶次郎, 近藤伸亮, 手塚明, デバイスオントロジーに基づく物理モデリング手法のシステムアーキテクティングへの応用, 第 23 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 論文番号 1401 (2013), 日本機械学会.
- Komoto, H. and Masui, K., Classification of design parameters with system modeling and simulation techniques, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.64, No.1 (2014), pp.193-196.
- Komoto H. and Tomiyama T., A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products, Computer-aided Design, Vol.44, No.10 (2012), pp.931-946.
- MapleSim, High performance physical modeling and simulation – technical computation software, version 6.0 (2012), Maplesoft.
- Modelica, A unified object-oriented language for physical systems modeling, language specification, version 3.3 (2012), Modelica Association.
- 室田一雄, 伊理正夫, マトロイド理論による連立方程式の構造的可解性判定, 情報処理学会論文誌, Vol.24, No.2 (1983), pp.157-164.
- OpenModelica, Open Source Modelica Consortium, available from <<https://openmodelica.org/index.php>>, (参照日 2013 年 8 月 1 日) .
- Schneiderman, B. and Plaisant, C., Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies (Last updated on 2009), available from <<http://www.cs.umd.edu/hcil/treemap-history/index.shtml>>, (参照日 2013 年 8 月 1 日) .
- Simscape, マルチドメイン物理システムのモデリングおよびシミュレーション, The Mathworks Inc., available from <<http://www.mathworks.co.jp/products/simscape/>>, (参照日 2013 年 8 月 1 日) .
- Suh, N., Complexity in engineering, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.54, No.2 (2005), pp.46-63.
- Umeda, Y., Ishii, M., Yoshioka, M., Shimomura, Y. and Tomiyama, T., Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol.10, No.4 (1996), pp.275-288.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI2206: Design methodology for mechatronic systems (2004), Beuth Verlag.
- Yoshioka, M., Umeda, Y., Takeda, H., Shimomura, Y., Nomaguchi, Y. and Tomiyama, T., Physical concept ontology for the knowledge intensive engineering framework, Advanced Engineering Informatics, Vol.18, No.2 (2004), pp.95-113.

References

- 20-Sim, The dynamic modeling and simulation package for iconic diagram, bond graph, block diagram and equation models, Controllab Products B.V., available from <<http://www.20sim.com/>>, (accessed on 1 August, 2013) .
- Basten, T., Hamberg, R., Reckers, F. and Verriet, J., Model-based design of adaptive embedded systems (2013), Springer New York.
- Bishop, C. M., Pattern recognition and machine learning (2007), Springer.
- D'Amelio, V., ElMaragh, W., Tomiyama, T. and Urbanic, J., Complexity of multi-disciplinary design, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.56, No.1 (2007), pp.185-188.

- de Kleer, J. and Brown, J. S., A qualitative physics based on confluences, *Artificial Intelligence*, vol.24, No.1-3 (1984), pp.7-83.
- Eppinger, S. D., Gebala, D., Smith, R. and Whitney, D. E., A model-based method for organizing tasks in product development, *Research in Engineering Design*, Vol.6, No.1 (1994), pp.1-13.
- Forbus, K.D., Qualitative process theory, *Artificial Intelligence*, Vol.24 (1984), pp.85-168.
- Fritzon P., Introduction to modeling and simulation of technical and physical systems with modelica (2011), IEEE.
- Hato. T. and Ohtomi, K., Design innovation applying 1DCAE, *Toshiba Review*, Vol.67, No.7 (2012), pp.7-10 (in Japanese).
- Hirota, K. and Ogasawara, S., *Electric vehicle engineering*, Morikita Publishing. (2010) (in Japanese).
- Iri, M., Murota, K. and Tsunekawa, J., Graph-theoretic approach to large-scale systems of equations: structural solvability and block-triangularization, *Information Processing Society of Japan Journal*, Vol.23, No.1 (1982), pp.88-95 (in Japanese).
- Japanese Society of Mechanical Engineers, *JSME Mechanical Engineers' Handbook*, Alpha7-51, (2007), the Japanese Society of Mechanical Engineers (in Japanese).
- JModelica, Open source Modelica platform for modeling, simulation and optimization, version 1.11, Modelon AB (2013).
- Kitamura, Y., Engineering domain ontologies, *The Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol.19, No.2 (2004), pp.179-186 (in Japanese).
- Komoto, H., Masui, K., Kondo, S. and Tezuka, A., Application of physical modeling based on device ontology to system architecting, in *Proceedings of the 23th JSME D&S division annual conference (bumon koenkai)*, Paper No.1401 (2013), the Japanese Society of Mechanical Engineers (in Japanese).
- Komoto, H. and Masui, K., Classification of design parameters with system modeling and simulation techniques, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol.64, No.1 (2014), pp.193-196.
- Komoto H. and Tomiyama T., A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products, *Computer-aided Design*, Vol.44, No.10 (2012), pp.931-946.
- MapleSim, High performance physical modeling and simulation – technical computation software, version 6.0 (2012), Maplesoft.
- Modelica, A unified object-oriented language for physical systems modeling, language specification, version 3.3 (2012), Modelica Association.
- Murota, K. and Iri, M., Matroid-theoretic approach to the structural solvability of a system of equations, *Information Processing Society of Japan Journal*, Vol.24, No.2 (1983), pp.157-164 (in Japanese).
- OpenModelica, Open Source Modelica Consortium, available from <<https://openmodelica.org/index.php>>, (accessed on 1 August, 2013) .
- Schneiderman, B. and Plaisant, C., Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies (Last updated on 2009), available from <<http://www.cs.umd.edu/hcil/treemap-history/index.shtml>>, (accessed on 1 August, 2013) .
- Simscape, The modeling of the multi-domain physics system and simulation, The Mathworks Inc., available from <<http://www.mathworks.co.jp/products/simscape/>>, (accessed on 1 August, 2013) (in Japanese).
- Suh, N., Complexity in engineering, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol.54, No.2 (2005), pp.46-63.
- Umeda, Y., Ishii, M., Yoshioka, M., Shimomura, Y. and Tomiyama, T., Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Vol.10, No.4 (1996), pp.275-288.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI), *VDI2206: Design methodology for mechatronic systems* (2004), Beuth Verlag.
- Yoshioka, M., Umeda, Y., Takeda, H., Shimomura, Y., Nomaguchi, Y. and Tomiyama, T., Physical concept ontology for the knowledge intensive engineering framework, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.18, No.2 (2004), pp.95-113.