

氏名	姜 東暁		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成26年3月20日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科専攻	秋田県立大学大学院システム科学技術研究科 博士後期課程総合システム科学専攻		
学位論文題目	アーキテクチャ理論に基づく新製品開発のモデリングとその解法に関する研究		
指導教員	准教授 <u>星野満博</u>		
論文審査委員	主査教授 <u>三品勉</u>		
	副査教授 <u>郭偉宏</u>	准教授 <u>木村寛</u>	
	(東京都市大学)		
	准教授 <u>星野満博</u>		

## 論文内容要旨

競争的ポジショニング戦略で明らかなように、マーケット・フォロワーと違いマーケット・リーダーである企業では、市場シェアを維持し続けるために利益に結び付けられる新製品の開発・設計は重要な役割を担っている。

製品設計のアイデアの良さに関わらず、利益につながる製品設計案か、そうでない設計案か、という判断は製品設計の評価と呼ばれる。例えば、製品の目標機能を達成できるか、スペースの小型化が実現されるかなどは製品設計案の評価に影響する要素である。しかし製品設計案の評価は、中小企業はもちろん、大手企業でも熟練者の暗黙知や経験に大きく依存しているのが一般的である。例として、本体が壊れにくい冷蔵庫の丈夫さの追求はアイデアとして良いが、必ずしも市場での利益に結びつかないパフォーマンスの一つである。経験の浅い設計者はそれを適正に評価できない恐れがある。また、新技術の導入により、熟練した設計者が新技術に対して詳しくないために、製品設計を適正に判断できないという問題が起きる。

従って、暗黙知に頼らず、熟練した設計者だけでなく経験の浅い設計者に対しても普遍的な議論を行える手法が必要である。それを実現するためには、誰でも扱える知識に還元しなければならない。先行研究として、製品設計における数理評価アプローチの構築は活発に議論されている。例えば、製品設計段階において、主にVE (Value Engineering)、QFD (Quality Function Deployment)、DSM (Design Structure Matrix)とLCC (Life Cycle Cost) の提案がある。一方、製品生産段階において、品質工学における田口メソッド及び類似部品加工法も含めて、多角度から製品設計案の評価手法を数理的にアプローチする方法の提案もある。しかし既存製品または機能間のすりあわせ(インテグラル)による新製品を作り出そうとしているところを考えると、これまでの方法ではどれもインテグラルの効果を評価することができない。

この不備を踏まえて、本論文では製品アーキテクチャ理論に基づいて、製品設計案に対する定量的な見方を提供する数理評価アプローチを提案する。製品アーキテクチャは、「製品の基礎的な設計思想」の一つである。製品分解に基づいて、製品アーキテクチャ概念は、(1) 機能の定義、(2) 機能とデバイスとのマッピング、及び (3) デバイス間のインターフェースの設計から成る。製品分解に基づいて、機能を代表するデバイス間のつながり状態をインターフェースで表し、製品の全般的なインターフェースの配置は製品設計案（製品アーキテクチャ）として定義される。異なる製品設計案の総合収益の違いは評価値で表される。一番良い評価値をもたらす製品設計案は最適設計として選ばれる。本学位論文では以下の流れで製品設計案の評価モデルの構築と実用性の考慮でモデルの数理解析に取り組む。

第1章「はじめに」の部分では、研究背景、研究目的について、また、主な現存の製品設計の数理手法 QFD と DSM のメリットとデメリットを紹介する。あわせて製品アーキテクチャ理論とその分類、モジュール型（くみあわせ）、インテグラル型（すりあわせ）およびハイブリッド型の簡単な説明を展開する。

第2章「製品設計のための最適化モデルの提案」の部分では、製品設計案の評価問題の定式化を行う。M 個のデバイスから構成される製品について考える。任意2つのデバイスを1つのインターフェースでつなげることから、インターフェースの最大個数 N は  $N=M(M-1)/2$  となる。インターフェースの配置は決定変数として、つながっていたら1で、そうでないと0で表す。インターフェースのつながりによって収益値で表す単独効用を生成する。一方、1つのデバイスは1つ以上のインターフェースを持つことが可能であり、2つのインターフェース間に共有デバイスが存在する場合もある。そのため、インターフェースそのものの単独効用に加えて、従来研究に考えられなかったインターフェース同士間の相互効用も考慮に入れたバイナリ2次組合せ最適化モデルを提案する。モデルパラメータである単独効用と相互効用の値が与えられた上で、最大の総合収益に対応する製品設計案を最適解として選ぶ。この提案モデルの新規性として、モジュール型の設計案のみでなく、インテグラル型も評価することができるようになる。

第3章「分枝限定法による2次モデルの厳密解析」の部分では、第2章で提案する2次組合せ最適化モデルの実用性を検証するためにモデルの厳密解析法を提案する。列挙法によると合理的な時間内に機能デバイス数  $M=8$ 、インターフェース数  $N=28$  のサイズまで厳密解を取った。しかし実問題規模を取り扱う厳密解法が望まれる。そのため第3章でこの問題点を解決する。提案モデルの非線形項部分、相互効用マトリクスに対して、対角（成分）線のデータがすべて0であるが、非対角（成分）線のデータは従来（の）問題と違い、正も負も取ることができる。例えば、限られたスペースの中にデバイスを組み込むことで、小型化を行うことができるが、デバイスのサイズや形によって他のデバイスの組み込みに悪影響をもたらすため、負の評価も許容する必要があるからである。しかし、この特徴により相互効用のマトリクスが非負定値行列であること（すなわち目的関数の凸性）を保証できないため、従来の勾配法で得られた解が最適解である保証はない。そのため本章ではこの2次モデルにおける非線形項と等価である線形項及び不等式制約を導入し、2次組合せ最適化モデルの1次等価変換モデルを提案する。さらに等価性を示す上で、1次等価変換モデルを解析する分枝限定法（Branch and Bound, BAB）を提案する。数値実験により列挙法より提案手法では製品設計の最適化解析を実用レベル（機能デバイス数  $M=16$ 、インターフェース数  $N=120$ ）に向上したことを検証した。

第4章「平均場近似法による製品設計の大規模問題の近似解析」の部分では、第3章で提案した厳密解析法でも解けない規模の製品設計問題の近似解法を考案する。この研究のモチベーションは、厳密解でなくても大規模問題の良い近似解は設計者の意思決定には役に立つ可能性があるためである。しかし、第2章の総合収益の観点から定義した製品設計モデルと違い、統計力学における多体システムの状態を

確率的に求められる平均場近似法 (Mean Field Approach, MFA) を援用する場合, その解法に適用する製品設計モデルの再構築の必要がある. そのため本章ではコストの観点から最小化の 2 次組合せ最適化モデルを改めて構築する. コスト最小化のモデルにおいて, インターフェースはつながっていたら 1 で, そうでないと -1 で表す. モデルのパラメータである単独効用と相互効用の定義は第 2 章と一致する. 平均場近似法のメカニズムは一つのインターフェースの試行分布の平均値は, 自身の単独効用とほかのすべての近傍であるインターフェースからもたらす相互効用の総和によって決まるものである. 平均場近似法ではモデルの計算量が  $O(2^N)$  から  $O(N^2)$  へ低減することを期待できる. 数値実験により提案手法では機能デバイス数  $M=100$ , インターフェース数  $N=4950$  のサイズまでの近似解析を行って提案手法の有効性を示した.

第 5 章「製品設計の組合せ最適化モデルに適用する一点変動近傍アルゴリズムの提案」の部分では, モデルの特徴に合わせて, 暫定状態の情報を用いた問題専用の高速の一点変動近傍法(One-Bit-Variant Neighborhood Algorithm)を援用するメタヒューリスティクスアルゴリズムを提案した. もともとの変動近傍法によって, 暫定解とその一点変動近傍解それぞれの目標関数値を計算した上で比較し, 両方の中より良い解を次の暫定状態として採用することの計算量は  $O(2^N)$  である. しかし, 第 2 章で提案する総合収益の最大化モデルによって発見した特徴に基づいて, 暫定解とその近傍解の優劣を評価する計算量が少ない新しい指標を見出した. 数値実験によって提案手法の計算量を  $O(2^N)$  から  $O(N^2)$  へ低減できることを証明した.

第 6 章「ボルツマンマシンによるモデルパラメータの推定解析」の部分では, 第 2 章で提案する製品設計の最適化モデルのパラメータの推定解析を行った. 第 3 章から第 5 章までモデルの厳密的 (または) 近似的な解き方は, モデルのパラメータ (インターフェースの単独効用とインターフェース間の相互効用) の値が正規分布に従ってランダムに与えられている. それは設計者の暗黙知によってパラメータを精確に定めることが簡単ではないためである. 本章では設計現場で提供しやすい製品設計案とそのカテゴリ評価値という観測データを利用して, パラメータの推定モデルを提案する. また, パラメータの数より少ない観測データしか取らない場合を勘案し, ボルツマンマシンを用いて学習誤差が 0 の下で汎化誤差を最小にする推定問題を解いた. 数値実験によって提案手法の有効性を検証した. 結果として, 推定回数の増加につれて推定誤差が安定的に収束する傾向を明らかにした. つまり, 十分な時間の下では提案する推定モデルによって最適推定を見出すことが可能である.

第 7 章「P メジアン法による最適解のクラスタリング」においては次の議論を (行った) 行う. 単一生産拠点での生産能力は限界があり, 全体としてのシステムの効率化を考慮して, 多くの機能デバイスからなる完成品を競争的な中間製品へ分割することも必要であるが, 先行研究ではこの問題に対して解答することができていない. そこで本章は, 機能情報のある経験則の解決策とクラスタリング手法の一つである P メジアン法(p-median)を用いて, クラスタ内部のインターフェース間のつながり密度ができるだけ大きく, クラスタ間のつながり密度ができるだけ小さくなる中間製品を導出するアーキテクチャ理論を改良した.

第 8 章「提案する製品設計アプローチの有効性を検証するための数値例」の部分では, 小規模の実例 (機能デバイス数  $M=4$ , インターフェース数  $N=6$ ) を用いて, 製品設計の 2 次組合せ最適化モデルの構築 (第 2 章の内容), ボルツマンマシンによるモデルパラメータの推定解析 (第 6 章の内容) と推定したパラメータに基づいて分枝限定法による 2 次モデルの厳密解析 (第 3 章の内容) を実施した. 結果として最適解とみられる実状態を再現したことが分かる. この例により製品アーキテクチャ理論に基づいて提案した製品設計アプローチの有効性を証明した.

第 9 章はまとめと今後の課題について述べている.

本論文の研究結果をまとめると、製品設計の数理評価アプローチを導入する前に、概念段階の製品設計は、熟練した設計者の暗黙知あるいは経験に依存した限定な評価しか行えないが、製品アーキテクチャ理論に基づいて提案した製品設計アプローチを導入することによって、人のノウハウよりもっと広い範囲の評価が可能になり、暗黙知に頼らずに熟練した設計者だけでなく経験の浅い設計者に対しても普遍的な議論が可能となる。本研究で提案している製品設計アプローチは設計者の意思決定の支援システムの一つとして貢献し、試作品を利益に結び付ける可能性を高めることが期待できる。

論文提出者氏名	姜 東暁		
論文題目	アーキテクチャ理論に基づく新製品開発のモデリングとその解法に関する研究		
指導教員	星野 満博		
論文審査委員	主査 教授 三品 勉 副査 教授 郭 偉宏 准教授 木村 寛 (東京都市大学) 准教授 星野 満博		

※本研究科以外に所属する場合はその所属を括弧書きすること

## 論文審査結果要旨

本論文は、製品アーキテクチャ理論に基づく新製品開発過程の評価モデルを構築し、さらにそのモデル構成パラメータの効率的推定手法及びモデルにおける最適解算出アルゴリズムを提案するものである。本論文は、製品アーキテクチャ理論における、K. Ulrich、Yin 等の研究に代表される一連のアーキテクチャ評価モデルの研究に関連するものである。

本論文は 9 章から構成される。主な内容は次の通りである。第 1 章では研究背景及び目的について、第 2 章では製品設計の為に数理評価モデルの提案、第 3 章では等価 1 次モデルの提案と分枝限定法による 2 次モデルの厳密解析について論じている。また、第 4 章、第 5 章においては大規模問題への適用とその近似解析、第 6 章においてはモデル構成パラメータの推定手法を提案している。更に、第 7 章では機能デバイスのクラスタリングについて、第 8 章では数値計算例、第 9 章では、まとめと今後の課題について言及している。

既存手法に製品機能のみで構成した製品構造マトリクス (DSM) 等があるが、これらの手法ではアーキテクチャの差異 (モジュールとインテグラル) を区別することができない。この問題に対処すべく、本論文では機能間のインターフェース及びインターフェース間の相互作用を考慮した総合利得最大化を扱う設計評価モデルを提案している。提案された本モデルは、数理的に 2 次組合せ最適化モデルとなっていて、問題の規模が大きい場合に厳密な最適解を導出することが困難である。本論文では、これを解決する為に、本モデルの数理構造を分析し、非線形項と等価な線形項を導入した等価 1 次モデルを提案している。更に、この線形モデルに分枝限定法を適用することにより、実用に耐えうる大きさの問題に対しても厳密な最適解を得ることが可能となった。特筆すべき点としては、本提案手法は、本論文でのモデル以外の、より一般的な最適化問題への拡張が期待できることが挙げられる。また、モデルのパラメータ、すなわち、各インターフェースやインターフェース間の相互作用に関する利得係数を推定する為、カテゴリ評価を用いたボルツマンマシン推定手法を提案し、その有効性を証明した。本提案手法は、熟練した設計者がもつ受け継ぎ伝えることが容易ではない経験や暗黙知を設計構想へ反映させる為の一つの提案である。

以上、本論文は学術的、工学的価値が高く、その研究成果は理論上及び実用上の観点において経営工学並びにその関連分野に大いに寄与できるものと評価できる。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。