最適化問題の自動階層分割手法と 3DLSI 概略設計への適用

Automated Dividing Method for Hierarchical Optimization and Application to 3DLSI Rough Design

寺田 識史*・岩田 剛治**・村田 秀則***・河村 憲****

Satoshi TERADA, Yoshiharu IWATA, Hidenori MURATA and Ken KAWAMURA

(Received February 21, 2018)

This research focused on a decomposition type optimization method that makes it easier to solve individual optimization problems by dividing the optimization problem into smaller optimization problems in multiple design spaces. Then, based on the parametric relationship of the product system model, a hierarchical optimization method to divide the optimization problem into optimizable optimization problems that can definitely define the objective function was studied. For this purpose, this research focused on the dependency relationship between the design variables of the optimization problem and the objective function and constructed an algorithm that divides and hierarchizes the optimization problem into an optimizable problem, which can be definitely defined by the objective function. By using this algorithm, this research adapted this method for 3DLSI rough design. As a result, we get the proper definition of optimization problem.

Key Words: Optimization, Production-System Model, Decomposition Optimization, Hierarchical Optimization

1. 緒言

最適化アルゴリズムはこれまで多くの研究がなされてきたが^{1)~6)}、基本的にどのアルゴリズムも、大規模問題に対応できているとは言い難い。原因の1つは、大規模問題は設計空間が大規模であるために、目的関数値の傾向を把握し切れないためである。

この問題に対するアプローチとして、最適化問題を複数の設計空間の比較的小さい最適化問題に分割することによって、個々の最適化問題を解きやすくする分割型の最適化手法が注目されている。

分割型の最適化手法の中で最も多くの研究がなされているのが、階層型最適化手法である^{7)~10)}。階層型最適化手法は、分割した最適化問題を階層的に分割して解いて、その結果を統合することにより元の最適化問題の最適解を導出する手法である。

この手法の課題は、最適化問題の分割・階層化の操作が使用者の手作業である点と、分割された最適化問題が、目

的関数を定義できるかの可否判断である。

現状では階層型最適化手法の分割・階層化アルゴリズムの多くは、モノや機能の観点での分割を採用している。しかし、モノや機能の観点での分割は、最適化問題としての視点が考慮されていないため、分割された最適化問題がどうなるかまでは考慮できていない。結果的に、最適化できない問題を生み出すことになり、計算を複雑にして、最適解が得られないという事態に陥ってしまう。

そこで本研究では、最適化問題を、確実に目的関数が定義できる、最適化可能な最適化問題に分割する階層型最適化手法について検討を行い、その手法を3DLSIの概略設計に適用した結果を報告する。

2. 新階層型最適化問題分割手法の構築

2.1 分割・階層化アルゴリズムの概要

最適化問題に最低限必要となるものは設計変数と目的関数である。最適化問題を分割する際には各最適化問題に設計変数と目的関数を定義する必要がある。この分割を行う

*大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (現パナソニック株式会社)

(〒565-0871 吹田市山田丘2-1) (〒135-0063 東京都江東区有明3-4-10 TFT ビル西館5 階)

Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (currently Panasonic Corporation)
(2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan) (TFT Building West-wing 5F, 3-4-10, Ariake, Koto-ku, Tokyo 135-0063, Japan)

**大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)
***大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (現機械工学専攻) (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)
Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (currently Division of Mechanical Engineering)
(2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

****大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (現ダッソー・システムズ株式会社)

(〒565-0871 吹田市山田丘2-1) (〒141-6020 東京都品川区大崎2-1-1 ThinkPark Tower)

Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (currently Dassault Systèmes K.K.)
(2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan) (ThinkPark Tower, 2-1-1 Osaki, Shinagawa-ku, Tokyo 141-6020, Japan)

Fig. 1 Flow of analysis of dependence relation between design variables and objective function using the reach ability matrix.

際の留意点として、共通の目的関数に依存する設計変数は独立に最適化できないことが挙げられる。このことから、設計変数に対してそれぞれ異なる目的関数を割り振り、それらの依存関係を見極めることによって、相互作用を生じない範囲で可能な限り最適化問題を分割するという分割・階層化アルゴリズムを提案する。

2.2 最適化方向の割り当て

最適化問題の目的関数は、定義された数だけしか存在しない。しかし、実際の最適化問題は目的関数と設計変数だけではなく、その間に複数のパラメータを介している設計変数でも目的関数でもないこのパラメータ（以下、中間パラメータとする）の中から目的関数になり得るパラメータを探すことが分割・階層化アルゴリズムの最初の操作である。

具体的には中間パラメータに割り当てる最適化方向を決めるために、関係式の分析を行う。目的関数から関係式を逆に辿っていき、中間パラメータの最適化方向が何なのかを分析していくことで、目的関数になり得る中間パラメータを明確化していく。

2.3 設計変数と目的関数の依存関係の明確化

関係式の分析の操作では、中間パラメータの最適化方向を分析し、最適化方向の明確なものを目的関数として定義し

た。その次に行うのは、設計変数がどの目的関数に依存するかを明確化する操作である。この操作の目的は、共通の目的関数に依存する設計変数は分けて独立に最適化できないことから、各設計変数の依存する目的関数を明確化して、分けて最適化できるかどうかの判断材料を得るためである。さらに、これらの操作により制約条件は影響を受けないので、制約を受ける変数に応じた最適化問題に割り当てればよい。

2.4 設計変数 - 目的関数の依存関係分析

関係式の分析によって中間パラメータに最適化方向を割り当てて、目的関数を新たに定義した後、次に行うのは、設計変数とその目的関数の依存関係を調べることである。

そこで、最適化問題のパラメータの関係を有向グラフとして捉え、可到達行列を求めることにより設計変数がどの目的関数に依存するかが分かる。

この可到達行列を用いた、設計変数と目的関数の依存関係分析の流れを Fig. 1 に示す。まず、求めた可到達行列の設計変数の要素がある列と目的関数の要素がある行の交点に、依存関係を表す「1」があれば、その設計変数から目的関数に対して依存関係があると判断できる。ただし、この時、設計変数に対して全ての目的関数との依存関係を見ることはしない。目的関数の内、その入力のパラメータも全て目的関数になっているものとの依存関係はあえて無視する。

Fig. 2 Hierarchization of optimization problem using DSM.

その理由は、その目的関数に辿り着くまでに既に他の目的関数に必ず辿り着いていることと、その目的関数への対応関係を入れてしまうと設計変数間に共通する目的関数が増えてしまい、分割の弊害になる可能性があることである。

以上のアルゴリズムを基に、各目的関数において行列の計算によって設計変数と目的関数間の依存関係の情報を自動的に抽出するプログラムを構築した。

これらの情報を元に最適化問題の分割可能場所が選定されるので、それらの場所すべてで階層化を行い階層型最適化問題の定義が可能となる。

2.5 自動分割・階層化アルゴリズム

この分割を行う操作では、村田らの研究で用いられている方法を参考にした¹¹⁾。村田らの研究では、最適化問題をシステムモデリングツールの Design Structure Matrix (DSM)¹²⁾を用いて、行列で表現・整理している。この DSM の行列は、先に出てきたパラメータの依存関係を行列で表したものと同様である。ここで、村田らの研究では、最適化特有の目的関数の値の評価から設計変数の値の変更を行うという操作を、目的関数から設計変数への依存関係として DSM に定義している。これを定義することによって、DSM を整理すると、設計変数から目的関数を導出し、その目的関数値を評価し、設計変数値を変更するという最適化の計算フローが明確になる。さらに、異なる目的関数に依存する設

計変数は異なる最適化フローに分けられるため、DSM の整理によって分割の操作も可能になる。よって分割の操作は、DSM の整理プログラムによって実現することにした。

分割を DSM 上で操作するため、階層化も DSM を用いて実現することにした。DSM を用いた階層化の流れを Fig. 2 に示す。DSM 上では、設計変数と目的関数の依存関係は、目的関数から設計変数への依存関係として表されている。この情報から、各設計変数の、他の設計変数と共通している目的関数の数を数える。その数が一番大きい設計変数を階層化し、その設計変数を除く、DSM の残りの部分を整理することで、最適化問題を分割するといった流れになる。

以上のように、DSM を用いた分割と階層化のアルゴリズムをプログラム化し、自動分割・階層化を実行する形とした。このアルゴリズムの概要を Fig. 3 に示す。

3. 新階層型最適化問題分割手法の 3DLSI 概略設計への適用

3.1 3DLSI 概略設計モデル

本研究では、このような背景から 3 次元 LSI の設計の最適化問題を検証モデルに採用した。3 次元 LSI のモデル図を Fig. 4 に示す。また、Fig. 5 にこの今回の 3 次元 LSI モデルの階層構造図を示す。

3.2 最適化問題の自動分割・階層化の実行結果

3 次元 LSI の設計の最適化問題に対して、本研究で構築

した自動分割・階層化手法を実行した結果を示す。この実行結果を基に、構築した分割・階層化アルゴリズムと自動分割・階層化アルゴリズムの検証・考察を行う。また、比

Fig. 3 Flowchart of decomposing/hierarchizing algorithm.

較対象として、従来の階層型最適化手法のモノと機能の観点での分割・階層化アルゴリズムによる分割・階層化の結果も示す。

(a) 従来の階層型最適化手法の分割・階層化の実行結果

まず、本研究で構築した分割・階層化アルゴリズムの比較対象として、従来提案されてきた階層型最適化手法の分割・階層化アルゴリズムによる分割・階層化の結果を示す。

従来の階層型最適化手法の分割・階層化アルゴリズムは、モノの観点での分割と機能の観点での分割であった。まず、3次元LSIの設計の最適化問題をモノの観点で分割・階層化した結果をFig. 6に示す。Fig. 6では分割された最適化問題の全ての詳細は割愛するが、例としてロジックチップの最適化問題の詳細を記述した。Fig. 6から分かるように、ロジックチップの最適化問題からLSIの最適化問題に伝達されるパラメータの内、ロジックチップ駆動周波数が最適化方向が分からず、目的関数として定義できない。このように、目的関数が定義できず、最適化できない問題が他にも多々あり、最

Fig. 4 3D-LSI structure.

Fig. 5 Hierarchical component structure of 3D-LSI.

Fig. 6 Object-based hierarchical decomposition of 3D-LSI optimization problem.

Fig. 7 Function-based hierarchical decomposition of 3D-LSI optimization problem.

適化が非常に困難になっていることが分かる。

次に、3次元LSIの設計の最適化問題を機能の観点で分割・階層化した結果をFig. 7に示す。Fig. 7の例では、3次元LSIの機能を処理速度、消費電力、コスト、周波数、面積に分けて階層化している。目的関数が定義できず、最適化できない問題は、モノの観点での分割よりは少ない

ものの、いくつか存在し、最適化が難しくなっていることが分かる。

以上のように、従来の階層型最適化手法では、3次元LSIの設計の最適化問題でも、目的関数が定義できず、最適化できない問題に分けてしまうという事態が起こり、最適化を難しくしてしまうことを確認した。

Fig. 8 The result of decomposing and hierarchizing of 3D-LSI optimization problem based on the proposal decomposing/hierarchizing algorithm.

(b) 新階層型最適化手法の分割・階層化の実行結果

次に、本研究で構築した階層型最適化手法の分割・階層化アルゴリズムによる分割・階層化結果を示す。ただし、同時に自動分割・階層化手法のアルゴリズムの検証も行いため、分割・階層化のプログラムの途中段階の実行結果についても述べていく。

まず、関係式分析プログラムの実行結果について述べる。3次元LSIの設計の単目的最適化問題に、元々定義されていた目的関数がF、一つであったのに対し、関係式分析の結果、F以外に145個のパラメータが明確な最適化方向(最大化、あるいは最小化)が割り当てられ、目的関数に新たに定義できた。

最後に、分割・階層化プログラムの実行した結果のDSMと、それによって最終的に導出された、分割・階層化された最適化問題をFig. 8に示す。DSMの各項目の濃い灰色が目的関数で、薄い灰色が設計変数である。Fig. 8より、目的関数から設計変数に付与した最適化計算のフィードバックループ(図中の②、③の四角の中の最上段

の黒四角の存在)以外のフィードバックループ(図中の②、③の四角の中の対角線より右上の部分に黒四角の存在)がないことが分かる。また、本来なかった依存関係の出現も確認できなかった。

以上より、本研究で構築した分割・階層化アルゴリズムと、自動分割・階層化手法の各アルゴリズムの妥当性を示すことができた。

4. 結言

製品モデルに基づく最適化問題分割について検討を行った。その結論を以下にまとめる。

- (1) 最適化問題の設計変数と目的関数の依存関係に着目し、その関係をマトリックスにより整理・操作することにより最適化問題を目的関数が確実に定義でき、最適化可能な問題に分割・階層化するアルゴリズムを構築した。
- (2) 3DLSIの概略設計に適用し、従来のモノや機能による分割とは異なる最適化問題としての分割手法を提案し、最適化問題の再定義ができる問題分割ができることを確

認した。

参考文献

- 1) N. Srinivas, Kalyanmoy Deb: Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms, *Evolutionary Computation*, **2-3** (1994) 221-248.
- 2) 渡邊真也、廣安知之、三木光範：近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化”、情報処理学会論文誌、**43-SIG 10** (2002) 183-198.
- 3) Yu-Jun Zheng, Sheng-Yong Chen: Cooperative particle swarm optimization for multiobjective transportation planning, *Applied Intelligence*, **39-1** (2013) 202-216.
- 4) Whei-Min Lin, Fu-Sheng Cheng, Ming-Tong Tsay: An Improved Tabu Search for Economic Dispatch With Multiple Minima, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, **17-1** (2002) 108-112.
- 5) Eckart Zitzler, Lothar Thiele: An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach, *TIK-Report*, **43** (1998) Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK).
- 6) Eckart Zitzler, Marco Laumanns, Lothar Thiele, “SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm”, *TIK-Report* **103** (2001), Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK).
- 7) Hyung Min Kim, Huei Peng, Nestor F. Michelena, Tao Jiang, John R. Birge, Panos Y. Papalambros: Target Cascading in Optimal System Design, *Transactions of the ASME*, Vol. 125 (2001).
- 8) Debiao Meng, Xiaoling Zhang, Hong-Zhong Huang, Zhonglai Wang, Huanwei Xu: Interaction Prediction Optimization in Multidisciplinary Design Optimization Problems, *The Science World Journal*, Vol. 4 (2014).
- 9) 岩田剛治、安村孝成、村田秀則、佐藤了平：システムデザインにおける階層型多目的最適化手法の基礎的検討、日本機械学会 第 20 回設計工学・システム部門講演会講演論文集 (2010) (1205-1)-(1205-6).
- 10) 小森茂明、吉村允孝、泉井一浩：評価特性間の相関関係に着目した階層構造化に基づく最適化戦略、日本機械学会 第 11 回設計工学・システム部門講演会講演論文集、(2001) 90-93.
- 11) 村田秀則、岩田剛治、佐藤了平、森永英二、岡本和也、青山和浩、古賀毅：システム定義手法を用いたシステムデザインにおける自動最適化アルゴリズムに関する研究、スマートプロセス学会誌、**3-1** (2014) 67-75.
- 12) M. D. Geunov, S. G. Barker: Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems, *Systems Engineering*, **8-1** (2005) 29-40.

代表者メールアドレス

岩田剛治 iwata@mapse.eng.osaka-u.ac.jp