新規レイアウト構造の創出に基づくモジュール化手法

西垣 英一^{*1}, 朝賀 泰男^{*1}

Modularization method based on creation of new layout structure

Hidekazu NISHIGAKI^{*1} and Yasuo ASAGA^{*1}^{*1} TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

41-1 Yokomichi, Nagakute-shi, Aichi 480-1192, Japan

Received: 20 February 2017; Revised: 16 June 2017; Accepted: 18 August 2017

Abstract

This paper describes a modularization method based on the creation of a new layout structure by combining topology optimization using beam elements and clustering analysis. By setting candidates for frame members in smaller units than parts and performing topology optimization using beam elements, a frame structure of new layouts as an aggregate of fine frame members can be created. For each fine frame member, connectivity as a structure in the entire frame structure is expressed as Design Structure Matrix (DSM). By performing hierarchical clustering on this DSM, clusters of fine frame members are formed as parts, and modules as these aggregate can be found out. Since this is hierarchically determined as a dendrogram, it is possible to determine the number of module divisions of the product configuration depending on the granularity of the cluster. Furthermore, by advancing each fine cluster towards the trunk above the tree diagram, an assembly process with less rework is obtained. Unlike the method of deriving the optimal solution for the product with existing structure, this research proposes a method to derive concurrently the new frame structure and construction of parts and module decomposition which minimizes rework. By validation analysis using a simple box structure, the effectiveness of this proposed method has been confirmed.

Key words : Finite element method, Structural design, Optimum design, Modular design, Process planning

1. 緒 言

将来社会は、エネルギー・環境問題、都市への人口集中や自動運転車の普及シナリオなど大きく変化することが予想（経済産業省、2016）され、モビリティに求められる機能や価値は社会変化へ柔軟で迅速に対応することが求められてきている。現在、限られた開発資源やコスト制約の中で世界各地での使用状況や顧客要求に応じた細かな設計仕様変更を効率的に行なうために、素材や部品の共通化・統合化・モジュール化が推し進められている。このような改善に基づく進化とは別に、自動運転車の開発に積極的に取り組む Google が地球規模の都市人口集中に対しサイエンスを通して都市生活を改善すると謳う別会社 Sidewalk Labs (Sidewalk Labs, 2016) や Flux 社 (Flux, 2016) を設立するなど、人の行動を学習し移動やそのサービスも包含する形で都市のあり方に IT 企業が参入してきている。

そのため、ものづくり企業の強みを活かす差別化戦略の更なる推進が求められている。全体最適のために大きく俯瞰しながら、すり合わせに代表される現場力の価値を引き出す手法として、社会や顧客の価値の変化に柔軟に適応する最適な多品種設計のしくみと工程を含めた最適化手法がその一つと考えられる。その際に、関係者の合意形成が得られ易い、原理に基づく構成関係の明示的な階層的表記手法の利用が望ましいと考えられる。

複雑に関連する製品構成を整理して数理的に処理するための有効な手段として設計構造マトリクス (DSM :

No.17-00065 [DOI:10.1299/transjsme.17-00065], J-STAGE Advance Publication date : 31 August, 2017

本論文は、第26回設計工学・システム部門講演会 講演論文集(2016), No.2210の掲載内容に基づいた論文である。

^{*1} 正員, (株) 豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1)

E-mail of corresponding author: e0793@mosk.tytlabs.co.jp

Design Structure Matrix) (Eppinger and Browning, 2012) の利用が挙げられる。DSM は、システム構成要素のつながりを行列として表記するため、構成要素間の因果関係を俯瞰でき、その要因解析に利用されている。トラックキャブを対象に操作や体感も含めた人と部品間の関連性を DSM で表記し、振動伝達と顧客要望の相関を分析することで、不具合の度合いを算出しリスク低減に役立てた研究 (Linden, 2016) が報告されている。

更に、行列の並べ替えを行うことで、他との関連性を少なくし内部のかたまりに関連性を集約させることができるため、モジュール候補を抽出する手法として用いられている。この際、モジュール間のつながりを明示的に把握できるため、製品設計のシステム最適化へ活用する研究も精力的になされている。製品システム全体を最適化可能な、システムデザイン手法として構築されている。DSM を用いてパラメータ間の依存関係が残らない設計タスクを抽出して手戻りを最小化、製品情報が明示的にモデル化され設計案を俯瞰的に評価できることで個別すり合わせではない全体最適化を可能とした研究 (古賀, 青山, 2010) (青山他, 2016) が報告されている。

また、モジュール候補を抽出する機能を、車体の分割設計に活かす試み (Pandremenos, 2011) もなされている。車体のプレス部品の関連性を DSM で表記し、自己組織化ニューラルネットワーク手法を用いてこの DSM 行列を並べ替えモジュール分割候補を見出すものである。この手法を 38 個のプレス部品から構成される車体に適用することで、「フロント構造」、「フロア構造」、「リア構造」、「客室の下部骨格」、「客室の上部骨格」の 5 つのかたまりとしてモジュール分割候補を求めている。これにより、顧客の好みに応じて意匠変更する際のボデー分割位置が得られたとされている。

しかし、これらは、構成要素がプレス部品など予め機能や領域が定められ、それらを統合した製品の最適解を導くことを想定している。部品構成の前例が無い新規レイアウト構造に対し、どの領域を個々の部品と定義し、それらを手戻りが少ない工程手順で如何にモジュール化すべきかを探索する、新企画の概念構想を俯瞰的に評価する研究例は見受けられない。ここでは、モジュール間の影響が最小限に留められているため、派生製品の共通構造領域を定め、生産する構造単位を見積もりながら企画構想することが可能となる。

本研究では、この新規レイアウト構造の企画構想を俯瞰的に評価するため、梁要素を用いたトポロジー最適化とクラスタ分析を連携して活用する手法を提案する。ここでは、部品より細かな単位で骨格部材の候補を与え、梁要素を用いたトポロジー最適化を実施することで、細かな骨格部材の集合体として新規レイアウトの骨格構造を創出する。各々の細かな骨格部材に対して、骨格構造全体の中での構成としてつながりを DSM として表現する。この DSM に対して階層的クラスタリングを実施することで、細かな骨格部材のクラスタ (房) が形成され、部品候補、その集合体としてのモジュール候補を見出せる。これは樹形図として階層的に求められるため、クラスタをどの粒度で選択するかで製品構成のモジュール分割数を定めることができる。更に、各々の細かなクラスタを樹形図上の太い幹に向かって進めることで、手戻りの少ない組付け工程が得られ、クラスタをある粒度でまとめたものは互いに関連の少ないモジュールと見なすことができる。本研究は、既存構造の製品に対する最適解を導く手法と異なり、新規構造の創出と同時に部品構成決めや手戻り工程最小のモジュール分割を導く手法を新たに提案するものである。

2. 新規レイアウト構造の創出とモジュール分割の流れ

2・1 提案手法の基本構成

新規レイアウト構造の企画構想を俯瞰的に評価するために提案する、梁要素を用いたトポロジー最適化とクラスタ分析を連携する手法について説明する。

その特徴は、部品よりも細かな単位の骨格部材の候補を与えたトポロジー最適化により新規レイアウト構造を創出して DSM で表記し、階層的クラスタリングによりクラスタを形成して部品候補とその集合体としてのモジュール候補を見出すものである。

本手法の手順は、図 1 に示すように大きく分けて 3 つのステップから構成される。

- (1) 梁要素を用いたトポロジー最適化手法による新規レイアウト構造の創出。
- (2) 梁要素を構成要素とする設計構造マトリクス DSM の構築。
- (3) 階層的クラスタ分析によるモジュール分割や工程のかたまり候補を視覚的に提示する手法。

(1) Topology optimization**(2) DSM (Design Structure Matrix)****(3) Clustering analysis**

Fig.1 Procedure of topology optimization and modularization

この3つのステップの組み合わせからなる本提案手法の全体構成の流れを説明するため、図2にフローチャートを示す。(1) 多くの細かな梁要素で構成される新規レイアウト構造をトポロジー最適化で創出し、(2) 行成分と列成分が共に同じ梁要素番号で配置される行列に対し、創出した構造を構成する梁要素間のつながりが有る（同一節点を共有する）行列成分に構造の特性としての値を配置することで設計構造マトリクス **DSM** を作成する。(3) **DSM** から梁要素間の類似性を距離として求め、この距離行列を基に最も近いペアを選択して2つの梁要素を1つのクラスター（房）に置換え再度距離を求め直すことをペアが無くなるまで繰り返す。このペアが作られる過程を樹形図（Dendrogram）として表記することで、モジュール分割や工程のかたまり候補を視覚的に提示するものである。

Fig. 2 Flowchart of modularization method for newly created layout structure

このように、本提案手法は (1)～(3) の3つのステップを組み合わせることで、部品構成の前例がない新規製品のレイアウト構造の創出とその最適部品構成およびモジュール構成を可視的な形で得られることが特長である。

2・2 新規レイアウト構造の創出と評価

多くの細かな梁要素で構成される新規レイアウト構造を創出するため、梁要素を用いたトポロジー最適化手法 (Nishigaki et al, 2000) を用いる。設定された体積の下で構造物の剛性を最大化するための手法として、(a) グランドストラクチャアプローチと、(b) 平均コンプライアンスの最小化を適用する。複合荷重条件下での多目的問題を扱うために繰り返し収束ステップ毎に最大ダメージを受ける負荷条件を考慮する Min-max アプローチを用いる。

グラウンドストラクチャアプローチでは、多数の固定節点を予めセットし、これらの節点間の全ての組合せに対して梁要素を配置する。そして、最適化手法を用いて設計変数を更新し、不要な梁要素を取り除いていくことにより、最適な梁構造形態を見つけ出していくものである。容易な操作性を実現するため、積み木を積上げる感覚で設計空間である三次元グラウンドストラクチャを構築する機能を開発している。設計変数は、中空円筒断面の直径とし、板厚は直径に定数を掛けて従属関係を持たせたものとする。

なお、創出されたレイアウト案の力学特性を評価する際は、梁要素用いた三次元の有限要素法プログラム (Nishigaki et al, 2000) (西垣他, 2011) を適用する。この評価手順を、図3に示す。

1. モデル定義を Excel で行なう。Excel シートの各セルに、節点情報 (座標値, 境界条件)・要素特性 (始点・終点の節点番号, 材料物性値, 断面形状定義) を入力する。この操作は、セルへの直接入力か、CAD 上で予め作成した骨格の図心を結んだ折れ線形状と断面形状の取り込みかを選択できる。データ入力後の解析モデル生成などのプログラミング機能は、Excel のマクロ機能 (Visual Basic for Application) を用いる。
2. モデル修正を Visual Basic を用いたプリプログラムで行なう。梁要素の断面形状修正, 境界条件修正, 節点移動, 要素分割, ジョイント定義などを必要に応じて実施する。修正データは、Excel シートに反映される。
3. Fortran を用いた有限要素法プログラムによる構造解析を実施する。
4. 解析結果の評価を、Visual Basic を用いたポストプログラムで実施する。解析ステップ毎に、構造物の移動や変形, 部材力分布, および各断面の応力分布などを把握できる。

1. Model Definition (Excel Sheet)

3. Analysis (Finite Element Method)

2. Modification (Pre-Program)

4. Evaluation (Post-Program)

Fig.3 Developed method for evaluation of frame structure

2・3 階層的クラスタ分析手法

モジュール分割や工程のかたまり候補を視覚的に提示する手法として階層的クラスタ分析を用いるが、具体例を通してその手法適用の具体的な考え方を示す。併せて、クラスタリングにより工程の手戻り減少が図れることを示す。

似通った要素をグループ化するための分析手法として、クラスタ分析がある。ここでは、個々の対象要素を次々とまとめながら大きなグループを構成して行く階層的クラスタ分析に注目する。分析手順は、要素の特徴を記した行列から類似度を表わす距離行列を作成し、距離が最も近い（ $\Leftrightarrow$ 関係が強い）もの同士を同じグループに分類（新しいクラスタを作成）して行く手順を繰り返すものである。クラスタの結合関係を樹形図（Dendrogram）と呼ばれる線図で示すことで、そのクラスタ群の構成や階層構造を視覚的に把握し、房のまとまりをモジュール候補として見出すことができる。このモジュールとして分割された要素群は、それらのつながり（インタフェース）の数が少なく、樹形図のつながりに従ってモジュール単位で構成要素の並べ替えを行えば、手戻りの少ない工程候補も見出せる。

要素の特徴を記す行列として、要素間の依存関係を網羅的に示す行列である設計構造マトリクス DSM を用いる。ここでは、行と列が共に同じ要素番号として項目を設定し、対角項は自らのつながりを表わすため“1”を設定する。それ以外の非対角項は、要素間のつながりが無ければ“0”を設定する。組付け順序や方向性を考慮して、列の項目で示す要素が、行の項目で示す要素に対して組付けていく方向の場合は“1”を設定し、組み付けられる場合は“0”を設定する。ただし、完全に固着する場合は、組み付けられる場合でも“1”を設定する。この手法によるクラスタリングの有効性を確認するため、ボールペンを例にした検討を実施した。

ノック式ボールペンの構成（Shamsuzzoha, 2009）を、図4に示す。この図で、双方向の矢印は最終的に固着することを表現し、一方向の矢印は組付ける方向を表現したものである。構成要素には番号を付与し、以下のDSMやクラスタリングにおける識別番号とする。

上述した要素間のつながりの記述法に従って、図4の矢印の関係を“1”と“0”でDSM表記したものを、図5に示す。

Fig. 4 Configuration of the knock-type ballpoint pen

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	1	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0	1	0
5	0	0	0	1	1	0	0
6	1	0	1	1	0	1	1
7	1	0	0	0	0	0	1

Fig. 5 Representation of DSM (Design Structure Matrix)

ここで、似通った要素のグループを次々とまとめて大きなグループを作る、階層的クラスタ分析を実施する。クラスタ間の非類似度（dissimilarity, 距離のように値の小さい方が類似性が高いことを表わす指標）として、今回はユークリッド距離を使用し、併合された時のクラスタ間の距離の定義方法として例題では群平均法（Group Average method）（Nielsen, 2016）を用いた。これは、可能な全ての対の非類似度の平均により両クラスタ間の非類似度を定義するものである。

具体的な演算式も含めたフローチャートと、例題に対する演算内容を図6に示す。

まず、ノック式ボールペンの構成から得られたDSMを用いて、クラスタリング分析を実施する。クラスタの似ていなさを示す数値である非類似度（dissimilarity）としてユークリッド距離 d_{ij} を使用し、この距離 d_{ij} が最小値となるペアを新たなクラスタとして統合する。例題では、 $d_{1,7}$ と $d_{7,1}$ が0と最小値になるため、要素1と要素7が近い系統として新たな一つのクラスタに統合される。新たなクラスタに対して他のクラスタとの距離を求め直し、クラスタ数が一つに統合されるまでクラスタリング分析の手順を繰り返す。このようにしてクラスタが統合

化される過程は、樹形図としてその階層構造が視覚的に求められ、要素 1 と要素 7 が統合される様子が描かれている。

Fig. 6 Flowchart of hierarchical clustering analysis (Group Average method) and example of knock-type ballpoint pen

このクラスタ分析により得られた、クラスタの結合関係である樹形図を図 7 に再掲する。そして、この要素の順序に従って行列の並べ替えを行った DSM を図 8 に示す。初期の DSM である図 5 と比較して、右上の非対角化項、特に対角項から離れた位置のつながり“1”が減少していることが確認できる。これは、工程の手戻り量が減少することを意味している。

手戻り量が減少していることを理解するため、要素を DSM 表記の順番に並べ、そのつながりとして順方向は右方向の矢印、逆方向（手戻り）は左方向の矢印として、図 9 に記述する。図 9 (a) は初期状態の図 5 に対応し、図 9 (b) はクラスタリング後の図 8 に対応している。初期の図 9 (a) に比べてクラスタリング後の図 9 (b) は、左方向へのつながりである手戻り工程のステップ幅が大きく減少していることが確認できる。

Fig. 7 Clustering analysis results (Group Average method)

Fig.8 Re-indication of DSM (after clustering)

Fig.9 Improvement of the process according to the clustering (reworks are decreased)

図7の樹形図にボールペンの各要素を重ねて表記することで、クラスタリング後のモジュール構成を視覚化し、工程のまとまり候補とそのつながりが視覚化されることを確認する（図10）。最下層から上の段に上るにつれ、各要素が組み付けられて行き、その段数は組付け個数を表わしている。段を上るにつれ、かたまりは大きくなって行く。これらのかたまりは、製品のモジュール候補を表わすとともに、製造時の組付け単位として工程のまとまり候補も表している。

Fig. 10 Visualization of the module configuration and process after clustering

次に、別の階層的クラスタ分析手法として、後述の3・3節で用いる近隣結合法 (Neighbour Joining method) (Saitou and Nei, 1987) についても、フレーム構造の具体例を通してその手法適用の具体的な考え方を図11に示す。

この例では、トポロジー最適化により得られた骨格のつながりから DSM を作成する。図11の右上に示す構造の、1番から5番の梁要素に対して節点を介して結合関係にある梁要素間の行列成分に“1”を代入する。要素1は要素2と要素4に結合されているため4つの行列成分 (1, 2), (2, 1), (1, 4), (4, 1) に“1”を代入することになる。一般的に、DSMでのつながり表記は方向性を有するが、ここでの梁要素のつながりは結合の有無に重きを置き、組付け順序や方向として同時双方向性を持たせ対称とする。なお、自らのつながりを表わす対角成分 (1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4), (5, 5) は、“1”を代入する。このDSMを用いて、クラスタリング分析を実施する。クラスタの似ていなさを示す数値である非類似度 (dissimilarity) としてユークリッド距離 d_{ij} を使用し、この距離 d_{ij} から他の要素との平均距離の和 $(r_i + r_j)$ を差引いた尺度が最小値となるペアを新たなクラスタとして統合する。例題では、 $M_{1,4}$ と $M_{4,1}$ が-3.171と最小値になるため、要素1と要素4が近い系統として新たな一つのクラスタに統合される。新たなクラスタに対して他のクラスタとの距離を求め直し、クラスタ数が一つに統合されるまでクラスタリング分析の手順を繰り返す。このようにしてクラスタが統合化される過程は、樹形図としてその階層構造が視覚的に求められる。この図から、初めに統合された要素1と要素4の他に、要素2と要素3が統合された後にこのペアに更

に要素 5 が統合される工程が理解できる。粒度として要素 2 つを選べば、要素 1 と要素 4 からなる上部構造のモジュールと、要素 2 と要素 3 からなる下部構造のモジュールに分割できる。更に細かい要素分割でこの問題を解けば、部品と見なせる小さなモジュールも見出すことができる。

Fig. 11 Flowchart of hierarchical clustering analysis (Neighbor Joining method) and example of newly created layout structure

3. 解析結果と考察

3・1 新規レイアウト構造の創出例

ボックス構造を用いた検証解析を通して提案手法の有効性を確認していく。部材を構成部品と見立てた骨格構造において、機能のかたまりでモジュールを分割し、つながりを階層化して最適な工程を見出す。

まず、力の流れに沿った最適な骨格レイアウトを定めるため、梁要素を用いたトポロジー最適化を行なう。設計可能空間に梁要素を張り巡らしたグラウンドストラクチャを定義する (図 12)。様々な形状に柔軟に対応するため、Excel のマクロを用いてグラウンドストラクチャを自動生成し、その際に全体寸法 (L, W, H, l_0 , h_0) をスライダーにより変更可能とする。梁要素の断面形状は円筒とし、設計変数を各梁要素断面の直径 ϕd とする。梁要素の最大直径は 200[mm]、体積制約 (最終体積/全梁要素が最大直径の場合の体積) は 10%、板厚 t は梁要素直径の 0.025 倍と設定する。なお、各寸法を、L=3000[mm], W=2000[mm], H=2000[mm], l_0 =1000[mm], h_0 =350[mm] として解析を実施した。図 13 に示す 5 つの境界条件を同時満足化する、トポロジー最適化結果を図 14 に示す。ロードパスに寄与しない不要な要素は削除され、必要な要素は相対的に太くなっていることが確認できる。

Fig.12 Grand structure for topology optimization

Fig.13 Boundary conditions

Fig.14 Optimized shape obtained by the topology optimization

3・2 製造要件を考慮した規格部材への置換え

トポロジー最適化により得られた骨格レイアウトに対して、調達可能な寸法諸元が離散化された規格部材への置換えを行なう。この際、トポロジー最適化結果の梁要素の直径に対し、十分細い梁要素は閾値 0.3（最大直径に対し直径が 30%以下）で削除した。

安全率を考慮した負荷条件下で、梁要素の最大発生応力が許容応力を超えずに最も軽量な規格部材を選択する、離散値に対する全応力設計を行なうこととする。全応力設計は最大発生応力が許容応力に等しくなるように求めるが、規格部材を用いるため理想的な全応力が求められない。そこで、図 15 に示すアルゴリズムで、最大発生応力が許容応力を超えない条件の下、各梁要素断面の直径 ϕd と板厚 t の値が成るべく小さくなる組合せを求める。

Table of standardized member

No.	Diameter ϕd	Thickness t	Allowable stress σ_y
1	d_1	t_1	σ_{y1}
2	d_2	t_2	σ_{y2}
...	...	...	...
n	d_n	t_n	σ_{yn}

Large Value
↓
Small Value

Fig. 15 Flowchart of fully stressed design for standardized member

ここでは、荷重の単位を[N]とし荷重スケールを 4.0×10^5 とする負荷条件下で、機械構造用高張力鋼鋼管を想定して表 1 に示す直径 ϕd 、板厚 t 、許容応力（安全率を 1 と仮定） σ_y の規格部材に対する全応力設計を実施する（図 16）。トポロジー最適化結果（図 14 (b)）と外観上は大きな違いは見られないが、想定荷重下で許容応力を超えない規格部材からなる構造として求められている。

Table 1 Specifications of the standardized member

No	Diameter ϕd [mm]	Thickness t [mm]	Allowable Stress σ_y [N/mm ²]
1	190.7	3.5	685.0
2	165.2	3.5	685.0
3	141.3	2.6	685.0
4	127.0	2.0	685.0
5	101.6	1.8	685.0
6	82.6	1.8	685.0
7	70.0	1.0	685.0
8	60.5	1.0	685.0
9	48.6	1.0	685.0
10	38.1	1.0	685.0
11	25.4	1.0	685.0

Fig.16 Results of fully stressed design for the standardized member

3・3 クラスタ分析によるモジュール化と考察

ここで、梁要素を部品と見立てたモジュール分割を実施する。ボールペンの例題で示したことと同様な、クラスタリングによるモジュール構成と工程の視覚化を、上記で求めた図 16 に示す骨格構造へ適用する。

部材を構成部品と見立てた骨格構造に対し、梁要素間のつながりを設計構造マトリクス DSM で表記し、大量のデータセットを効率良く扱える近隣結合法（Neighbour Joining method）（Saitou and Nei, 1987）によるクラスタリング分析を行なう。クラスタの結合関係である樹形図として表示することで、モジュール候補とつながりを把握することができると同時に、工程のまとまりとする候補も把握することができる。このようにして求めた樹形図を、図 17 に示す。最下層から上の段に上につれ、各要素が組み付けられて行く。その段数は組付け個数を表わしている。段を上るにつれ、かたまりは大きくなって行く様子が確認できる。小さな三角領域が集まりながら大きな三角領域を形成しているが、三角領域毎にアルファベットを割り振り骨格構造の対応箇所を図 18 とともに確認すると、部材の構造的な小さなかたまりが次第に積み重ねられて大きなかたまりになることが理解できる。

Fig.17 Visualization of the module configuration and process after clustering (Neighbor Joining method)

Fig.18 Correspondence of clusters of dendrogram and modules of framed structure

そして、図 18 と図 17 を見比べれば、A, B, C は奥側の上部構造に対応し H, I, J は手前側の上部構造に対応している。D, E は奥側下部の右側部と中央部の結合部に対応し、K, L は手前側下部の右側部と中央部の結合部に対応している。これらの骨格構造で奥側と手前側で対称となっているかたまりは、図 17 の樹形図上でも A, B, C と D, E が一つの大きな三角領域を形成し、同様に H, I, J と K, L も一つの大きな三角領域を形成し、対称的な形状をなしている。残りの三角領域である F, G は、下部左側の連続的な構造をほぼ対称形に分割していることが確認でき、全体としてモジュール候補と工程のかたまり、および、組付け順序の候補を見出せることが確認できる。

このように、部品よりも細かな単位の骨格部材の候補を与えたトポロジー最適化により新規レイアウト構造を創出し（図 14）、このレイアウトに対して製造要件を考慮した規格部材へ置き換え（図 16）、骨格のつながりを DSM で表記して階層的クラスタリングによりクラスタを形成した。その結果、図 18 に示すように部品構成の前例が無い新規レイアウト構造に対して部品候補を見出すことができ、更にその集合体として図 17 に示すモジュール候補を手戻り工程の少ない組付け順序となる階層構造として見出すことができた。

4. 結 言

本研究では、新規レイアウト構造の企画構想を俯瞰的に評価するため、部品より細かな単位で骨格部材の候補を与え、トポロジー最適化と設計構造マトリクスへのクラスタ分析を組合せることで、新規構造の創出と同時に部品構成決めや手戻り工程最小のモジュール分割を導く手法を提案した。部品構成の前例が無い新規レイアウト構造に対し、どの領域を個々の部品と定義し、それらを手戻りが少ない工程手順で如何にモジュール化すべきかに主眼を置いたものである。本提案手法の具体的な手順は、大きく分けて次の 3 つのステップで構成した。

- (1) 梁要素を用いたトポロジー最適化手法による新規レイアウト構造の創出。
- (2) 梁要素を構成要素とする設計構造マトリクス DSM の構築。
- (3) 階層的クラスタ分析によるモジュール分割や工程のかたまり候補を樹形図で視覚的に提示する手法。

ボックス構造を用いた検証解析により、ロードパスに寄与しない不要な要素は削除され必要な要素が相対的に太くなる新規レイアウト構造が創出され、左右で対称となる部品候補とその集合体であるモジュール候補が手戻りの少ない組付け順序となる階層構造として得られたことで、提案手法の有効性を確認することができた。

文 献

青山和浩, 大泉和也, 古賀毅, 製品システム設計におけるシステムの構造分析とマネジメント, 横幹, Vol.10, No.1 (2016), pp. 22-37.

Eppinger, S. D. and Browning, T. R., Design structure matrix methods and applications (2012), The MIT Press.

Flux, available from <<https://flux.io/>>, (参照日 2016 年 12 月 15 日).

- 古賀毅, 青山和浩, 製品設計における手戻りと矛盾のトレードオフを考慮した設計プロセスの導出手法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.761, (2010), pp.215-224.
- Linden, J., Sellgren, U. and Soderberg, A., Model-based reliability analysis. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 30, Issue 3 (2016), pp 277-288.
- 経済産業省, 2016:新産業構造ビジョン ～第4次産業革命をリードする日本の戦略～ 産業構造審議会 中間整理, available from <http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/008_05_01.pdf> , (参照日 2016 年 12 月 15 日).
- Nielsen, F., Hierarchical clustering, Introduction to HPC with MPI for Data Science, Springer (2016), pp.195-211.
- 西垣英一, 朝賀泰男, 林貞幸, 環状骨格構造の衝撃応答評価手法の開発, 日本機械学会 2011 年度年次大会 DVD-ROM 論文集 No.11-1 (2011).
- Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N., First order analysis for automotive body structure design, ASME DETC2000/DAC-14533 (2000).
- Pandremenos, J. and Chryssoulouris, G., A neural network approach for the development of modular product architectures, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol.24, No.10 (2011), pp 879-887.
- Saitou, N. and Nei, M., The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees, Molecular Biology and Evolution, Vol. 4, Issue 4 (1987), pp. 406-425.
- Shamsuzzoha, A. H. M., Restructuring design processes for better information exchange, International Journal of Management and Enterprise Development, Vol. 7, No. 3 (2009), pp. 299-313.
- Sidewalk Labs, available from <<http://www.sidewalklabs.com/>> , (参照日 2016 年 12 月 15 日).

References

- Aoyama, K., Oizumi, K. and Koga, T., Design management with structural analysis of the product systems, Oukan Vol.10, No.1 (2016) (in Japanese).
- Eppinger, S. D. and Browning, T. R., Design structure matrix methods and applications (2012), The MIT Press.
- Flux, available from <<https://flux.io/>>, (accessed on 15 December, 2016).
- Koga, T. and Aoyama, K., Design process guide method for minimizing design loops and design conflicts, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol.76, No.761 (2010), pp.215-224 (in Japanese).
- Linden, J., Sellgren, U. and Soderberg, A., Model-based reliability analysis. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, Vol. 30, Issue 3 (2016), pp 277-288.
- Ministry of Economy, Trade and Industry, Vision of New Industrial Structure - Japan's strategies for taking the lead in the Fourth Industrial Revolution - (in Japanese), Interim Report by New Industrial Structure Committee, available from <http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/008_05_01.pdf>, (accessed on 15 December, 2016).
- Nielsen, F., Hierarchical clustering, Introduction to HPC with MPI for Data Science, Springer (2016), pp.195-211.
- Nishigaki, H., Asaga, Y. and Hayashi, S., The development of impact response evaluation method of the circular framed structure, The Japan Society of Mechanical Engineers, Annual Meeting 2011, G120012 (2011) (in Japanese).
- Nishigaki, H., Nishiwaki, S., Amago, T. and Kikuchi, N., First order analysis for automotive body structure design, ASME DETC2000/DAC-14533 (2000).
- Pandremenos, J. and Chryssoulouris, G., A neural network approach for the development of modular product architectures, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol.24, No.10 (2011), pp 879-887.
- Saitou, N. and Nei, M., The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees, Molecular Biology and Evolution, Vol. 4, Issue 4 (1987), pp. 406-425.
- Shamsuzzoha, A. H. M., Restructuring design processes for better information exchange, International Journal of Management and Enterprise Development, Vol. 7, No. 3 (2009), pp. 299-313.
- Sidewalk Labs, available from <<http://www.sidewalklabs.com/>>, (accessed on 15 December, 2016).