

構造最適設計システム 3D FINAL DESIGN の適用事例

APPLICATION OF STRUCTURE OPTIMIZATION SYSTEM 3D FINAL DESIGN

趙 希禄¹⁾, 中村 和彦²⁾, 遠藤 正司³⁾, 名取 孝⁴⁾
 Xilu ZHAO, Kazuhiko NAKAMURA, Masashi ENDO and Takashi NATORI

- 1) 工博 (株)富士テクニカルリサーチ 技術部長代理 (〒240-0003 横浜市保土ヶ谷区天王町 1-19-17)
- 2) (株)富士テクニカルリサーチ 技術部 主任エンジニア (〒240-0003 横浜市保土ヶ谷区天王町 1-19-17)
- 3) (株)富士テクニカルリサーチ 専務取締役 技術部長 (〒240-0003 横浜市保土ヶ谷区天王町 1-19-17)
- 4) (株)富士テクニカルリサーチ 代表取締役 社長 (〒240-0003 横浜市保土ヶ谷区天王町 1-19-17)

In order to solve shape optimization problems of part level in machinery design field, the structure optimization software 3D FINAL DESIGN was developed. It made 3D FINAL DESIGN to one package including several function modules such as structural analysis, design sensitivity analysis, preprocessor, postprocessor and calculation progress monitor, so that it could satisfy all needs of structure optimization of design engineer in machinery factory. The basis vector method was applied to shape optimization, and added the creation functional module of basis vector in preprocessor. This paper describes 3D FINAL DESIGN system composition, functions and some application of examples.

Key words: Structure optimization, Basis vector method, Shape optimization, Structure analysis

1. はじめに

近年来、構造解析技術を一步進めた構造最適設計に関する研究は、大学の研究室および研究所のレベルで盛んに行われており、数々の研究成果が論文や報告書にまとめられている⁽¹⁾。しかし、機械産業界における利用実績はまだ少なく、設計者が理解し簡単に使用できる構造最適化専用ソフトウェアは極めて少ないのが現状である。

八十年代から FEM 解析を用いた構造最適設計がスタートし、構造軽量化のための板厚や断面積を設計変数とする、いわゆる構造サイジング最適化が盛んに行われていた。最近、スーパーコンピュータを始めとするハードウェアの進歩、大規模構造および非線形解析技術の充実と共に、近似モデルを背景に実験計画法やニューラルネットワークを利用した応答曲面法を導入して、最適化の検討範囲及びモデル規模が一層拡張されている⁽²⁾。

一方、機械産業界の設計現場では、よく見られている中小規模かつ多品種の「部品レベルの構造最適化問題」が多数存在している。ここで関連する解析の大半は線形弾性範囲の静解析と固有値解析であるといえる。設計者の経験や会社規格などにより、部品レイアウトまたは位相関係を決めた段階において、部品に対する変形量、応力、反力および固有振動数の制約条件をかけた上で、幾何学形状や板厚などパラメータを調整することによって、個別部品の詳細にまで構造最適化を実施する。しかし、機械部品のほとんどは、三次元的に複雑な形状をもち、かつ複雑な荷重や拘束条件があるため、なるべく幅広い部品の構造最適化に対応でき、設計者が直接使用できるような汎用構造最適設計ソフトウェアの必要性がますます強まっている。

本報告では、様々な機械設計分野によく見られている中小規模かつ多品種、いわゆる「部品レベルの構造最適化問題」を解決するために自主開発した構造最適設計専用ソフトウェア 3D FINAL DESIGN^{(3)~(5)}を紹介する。まず、プログラムの構成と特徴、開発中の問題点および解決策などを述べ、さらに適用事例を用い、プログラムの実用性と有効性を検証した結果を報告する。

2. システムの概要

本構造最適化システムは、汎用構造解析モジュール、設計感度解析モジュール及び最適化モジュールを一体化とし、さらにプリプロセッサとポストプロセッサを加えて構成した構造最適設計専用パッケージである。

構造解析モジュールには静解析、固有値解析、熱伝導と熱応力解析を含む。設計感度解析モジュールには直接微分法と差分法を、最適化モジュールには逐次二次計画法と逐次線形計画法を適用する。繰り返し計算の高速化を実現するため、各種要素や解法などを検討したうえで、すべてのモジュールを自主開発している。

システム全体のモジュール構成は図 1 に示す。

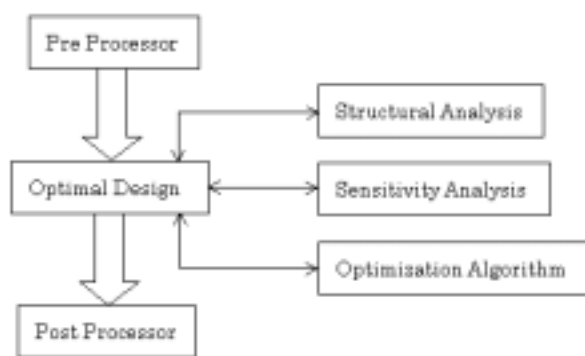


Fig.1 Flowchart of the 3D FINAL DESIGN System

3. 構造最適設計機能

3D FINAL DESIGN に扱う構造最適設計機能は下記のように設定している。

目的関数：構造重量の最適化、構造変形の最適化、応力分布の最適化、拘束反力の最適化、熱応力分布の最適化、固有振動数の最適化

設計変数：板厚、構造幾何学形状（ベースベクトル係数）

制約条件：構造重量の上限値と下限値、構造変形の上限値と下限値、集中応力の上限値と下限値、拘束反力の上限値と下限値、温度の上限値と下限値、熱応力の上限値と下限値、固有振動数の上限値と下限値

具体的な構造条件と設計要求に対して、GUI をベースとした最適化条件設定ツールを用い、以上の最適化機能項目からいくつかを選択し最適化問題を構成することができる。最適化手法は、比較的安定的な収束性をもつ、且つ経験係数（ペナルティ係数やラグランジュ係数など）を持たない逐次二次計画法と逐次線形計画法を適用する。また、静荷重と熱荷重の組合せ、静荷重と固有値の組合せ、静荷重が多ケース発生した場合など、多数の計算条件の組合せを同時に考慮した最適解を求めることが可能である。

4. プリポスト機能

3D FINAL DESIGN のプリポスト機能は下記に示したような部分から構成されている。

・Manager 機能 プリプロセサー、ポストプロセサーと計算ソルバーの統合管理、最適化計算の実行状況のモニタリング、メモリの管理とプリンターへの出力管理を含む。

・File I/O 機能 汎用 CAM/CAD (IGES, DXF など) データ, 3D FINAL DESIGN 以外の汎用 FEM データ (MARC, MSC/NASTRAN, ABAQUS など), 画像データ (TIF, BMP, PostScript) とテキスト形式での数値データをサポートする。

・Model/Mesh Generator 機能 Point, Curve, Surface といった幾何学形状データ, Node, Element といった解析モデルデータの生成機能, Auto Mesh 機能, ベースベクトル作成機能および各種 Entity 機能を実装する。

・Setup 機能 各種要素/材料特性、荷重条件、温度条件、拘束条件などの解析計算条件、目的関数、設計変数、制約条件などの最適化計算条件を設定する。

・Solver 機能 最適化計算、構造解析計算の実行をコントロールする。

・Post 機能 変形図、コンター図、ベクトル図、グラフ表示および最適化履歴表示の機能をサポートする。

5. 形状最適化のベースベクトル法

構造形状の変更を表現するには表1に示すような節点座標（または節点グループ）を設計変数とする方法がよく使われている。

Table1 Shape Change Method for Optimum Design

主な手法	設計変数	特徴	短所
関連ライン法	ラインに乗せた節点グループの位置	実現容易	適用範囲が狭い リメッシング困難
有向ベクトル法	参照点から変更点までの距離	実現容易	適用範囲が狭い リメッシング困難
アイソ写像法	アイソ写像のキーポイント座標値	適用範囲がやや広い	形状コントロール困難
ベースベクトル法	基本形状変更パターンの重み係数	適用範囲が広い リメッシング不要	ベースベクトルの作成が必要

3D FINAL DESIGN では、形状最適化問題にベースベクトル法を適用した。ベースベクトル法は、あるまとまった節点グループの移動を一つの基本形状変更パターンとみなし、一つの形状設計変数で対応させる。形状最適化計算のために解析モデルの形状変更部分の節点座標をまとめて、一つのベクトルで表す。

$$\alpha = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_v, y_v, z_v]^T \quad (1)$$

幾つかの形状変更の可能なパターンに対して、式(1)のようなベクトル、いわゆるベースベクトル $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_v$ を作成する。この v 個のベクトルは v 次元線形空間の一組基底ベクトルとなる。次に、ベースベクトルを使い、設計変数が変化したときの新しい形状の節点座標ベクトル α は

$$\alpha = \alpha_0 + X_1(\alpha_1 - \alpha_0) + X_2(\alpha_2 - \alpha_0) + \dots + X_v(\alpha_v - \alpha_0) \quad (2)$$

で与えられる。ここでは、 α_0 はオリジナル形状の座標ベクトル。 X_1, X_2, \dots, X_v は形状をコントロールする設計変数で、これらの設計変数を調整することによって、形成された構造形状をコントロールすることができる。

6. 適用事例

(1) タビーン動翼羽根植込み部の形状最適化

植込み部の構造と解析モデルを図2に示す。解析メッシュの節点数 656、要素数 559 である。回転による遠心力が植込みの先端に加える。ロータと接触する部分の摩擦効果は無視する。最適設計では、応力集中を抑えることを目的とする。各フックの羽根側とロータ側に代表的な要素を選択し、その応力とを最小化する。制約条件は、各フックにおける応力を許容値以下に、全体的に荷重が分担されるように各フック間の応力差を許容値以下にする制約条件を加え、制約条件の数は 27 個である。図3はベースベクトルで表される形状変更パターンは、歯先傾き角度 $\Delta \alpha$ 、横幅 ΔL 、縦幅 ΔH 、歯接触面角度 $\Delta \beta$ 、歯表面挟み角度 $\Delta \gamma$ を変更するパターンと、第1

フック傾斜角度 $\Delta\theta$ 、第1フック曲率半径 Δr を変更する局所的なパターンで、合計7個である。

すべての最適化計算は、パソコンで実行し、13秒の時間で7回の反復計算で収束し最適解を得た。

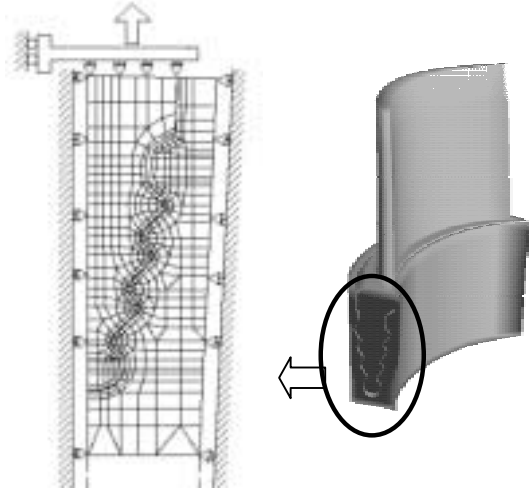


Fig. 2 FEM Model for Fixed part of the Blade

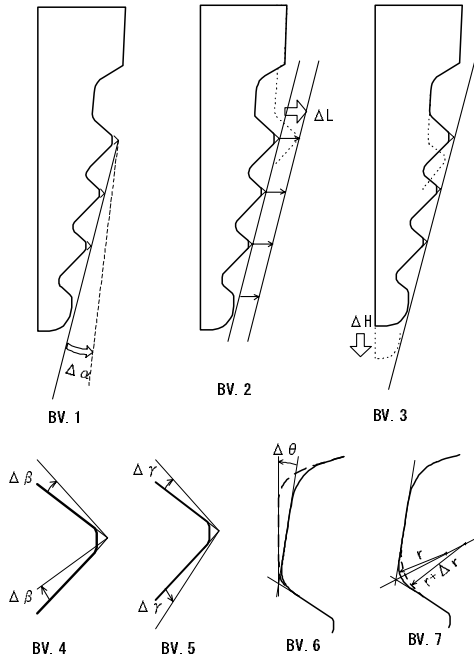
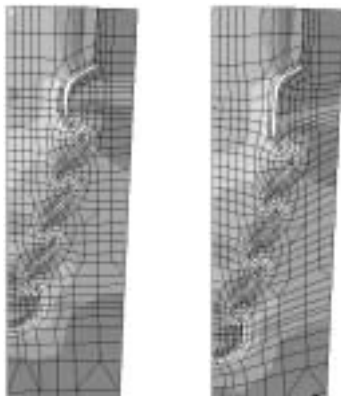


Fig. 3 Basis Vectors for Shape Change



(a). Initial Shape (b). Optimum Shape

Fig. 4 Shape and Stress Distribution of Blade

Table. 2 Change of Design Variables

Variable	Low.	Up.	Initial	Optimal
$\Delta\alpha$	-1.00	1.00	0.00	-0.401
ΔL	-1.00	1.00	0.00	0.745
ΔH	-1.00	1.00	0.00	1.000
$\Delta\beta$	-1.00	1.00	0.00	-0.573
$\Delta\gamma$	-1.00	1.00	0.00	0.214
$\Delta\theta$	-1.00	1.00	0.00	1.000
Δr	-1.00	1.00	0.00	0.956

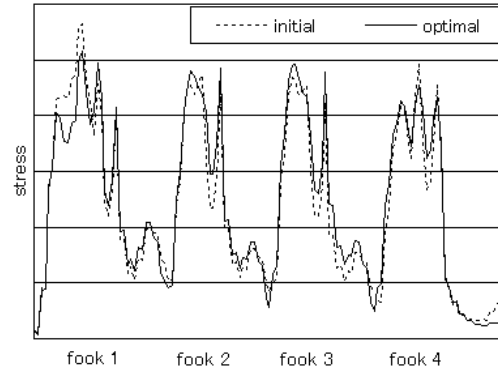


Fig. 5 Stress Distribution of Blade Side

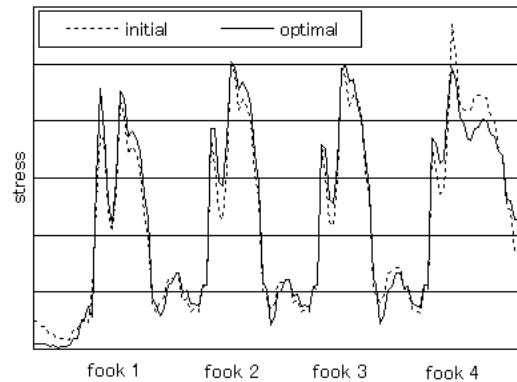


Fig. 6 Stress Distribution of Rotor Side

初期形状と最適形状の応力分布を図4に、各変更パターンに対応するベシスベクトル係数の変化を表2に、羽根の表層に沿って要素積分点のミーゼス応力値の分布を図5と図6に示す。図中により、初期形状で応力が高い見られる羽根側の第1フックと、ロータ側の第4フックの集中応力を減少された。また、各フックでの最大応力はほとんど同じ値となり、各フックの応力差が減少され、全体的な応力バランスが改善されたことがわかった。

(2) エンジンマウントブラケットの応力分布最適化

図7に示すのは、乗用車エンジンの後にあるエンジンを固定するマウントブラケットである。

図中の点線は設計中構造形状の変更できる範囲を表し、最適化計算では、それらの変更範囲をベシスベクトルに表される。解析メッシュの節点数は 9779 個、三次元ソリッド要素は 7544 個である。拘束条件として、

四箇所のボルト締結部を完全固定，下面全面を上下方向に拘束とする。荷重条件は上部穴（R1）の下半分内径に沿って，均一荷重がかかり，荷重の値は軸方向に600kg，横方向に2300kg，下方向に4500kgである。

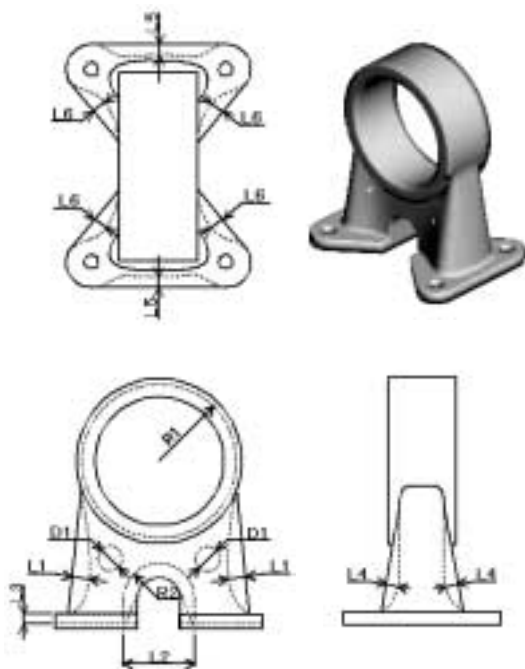
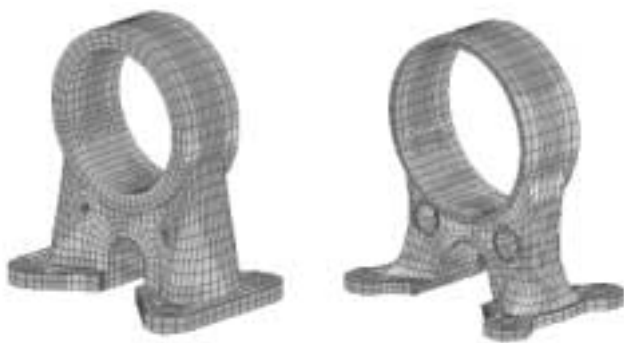


Fig. 7 The Structure and Shape Change Area

Table. 3 Change of Design Variables (mm)

	Maximum	Initial	Optimum	Adopt
L1	8.4	0.0	8.4	100%
L2	60.0	30.0	57.0	90%
L3	5.0	10.0	6.9	62%
L4	5.4	0.0	5.4	100%
L5	7.0	0.0	7.0	100%
L6	6.6	0.0	4.6	70%
D1	18.0	0.0	18.0	100%
R1	54.0	45.0	52.9	88%
R2	25.0	15.0	20.0	50%



(a). Initial Shape (b). Optimum Shape

Fig. 8 Stress Distributions of Engine Mount Bracket

最適化計算の目的関数は，構造の重量を最小化とする。制約条件は，各部分の最大応力を 14.0kgf/mm^2 以下とする。最適化計算は，パソコンで5時間47分，4回繰返し計算を経て最適解を得た。図4において点線で表される形状変更パターンに対応する最適なパラメータを表3に示す。

図8に示す応力分布図では，オリジナル形状の最大ミーゼス応力が 9.84kg/mm^2 で許容値 (14.0kg/mm^2) との差がかなり有り，必要以上に無駄な材料が使われていることが分かる。最適化形状の最大ミーゼス応力が 13.68kg/mm^2 でオリジナル形状に比べ高くなっているが，許容値との差が小さく，各部位の応力は分散化されており，材料の性能を十分生かしていることが分かる。一方，目的関数とした重量はオリジナル形状と比べ49.9%軽量化された。

7. まとめ

機械産業界における静解析、熱応力や振動固有値問題を中心とする部品レベルの構造最適設計ソフトウェア 3D FINAL DESIGN を開発した。その特徴としては，プリポスト、最適設計、構造解析と感度解析のモジュールをすべて自主開発し，一つのパッケージにした。構造形状最適化するには，ベシスベクトル手法を適用し，プリプロセッサではベシスベクトルの生成とチェック機能を追加した。実際にタビーン動翼羽根植込み部とエンジンマウントブラケットの形状最適化に適用した結果を用い，ソフトウェアの有効性と実用性を明かにした。

参考文献

- 1). 日本機械学会：構造・材料の最適設計，技報堂，1989
- 2). 萩原一郎：最適化手法の動向とこれからの方向について，振動騒音の最適化，自動車技術会，pp381-388，1998
- 3). 趙希祿：構造最適設計システムの開発について，第17回設計シンポジウム，pp77-81，1999，
- 4). 趙希祿：静的な制約条件をもつ三次元板・シェル構造の振動特性最適化，機講論 D&D'99，pp333-336，1999
- 5). 趙希祿：ベシスベクトル法を用いた三次元構造の形状最適設計，機講論 D&D'99，pp139-142，1999