

氏名	下田 昌利
所属機関	豊田工業大学・工学部・先端工学基礎学科
研究題目	薄肉曲面構造体のデザイン支援のための最適フリーフォルム創成システムの開発に関する研究

1. 研究の目的

人工物の重要な構成要素となっている膜やシェル構造は曲率を有した薄肉曲面構造体であり、各種工業製品に幅広く使用されている。美的要素があり、力学的にも優れた特性を有する構造体であるため、そのデザインには力学特性と意匠性の両者が求められる。製品の軽量化への寄与も非常に大きく、環境や省資源の観点からもその果たす役割は今後益々増大する。一方、その軽量性から非適切なデザインは環境を害する振動や騒音を招くため、最適なフォルム、すなわち最適曲率分布を普遍的に求め得る計算機を利用したデザイン支援システム開発が望まれている。そこで本研究では膜やシェル構造について、振動と騒音の観点から最適な任意の曲率分布（無限自由度のフォルム）デザインが可能な理論、アルゴリズム及びプログラムを含む汎用最適化デザインシステムを構築することを目的とする。本研究により、力学的に自然なフォルムが自動創成され、意匠性を制約条件に加えながらの力学特性の最適化も可能となる。また、振動と騒音のコントロールが可能になり、一歩進んだ心地よい音創り研究にも繋がる。これまでにない新たなフォルムの創成に繋がる本研究はデザインと情報工学、構造力学及び応用数学の学際的な研究に位置づけられ、今後の幅広い分野への展開も期待できる。

間接的な目的として、設計現場では形状設計は実績ベース（経験的）が基本となっている。構造検討にはCAEが利用されているが、繰り返しの試行錯誤計算にて最終形状が決定されている。境界条件の明らかな設計問題は上記の最適化の解法と計算機の力を利用して自動計算させ、デザイナーはよりクリエイティブな業務に注力すべきであると考えている。それに応えるための研究でもあり、知識や経験を補い、時間的、経済的にも効率的なデザインワークを支援するシステムとする。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

(1) 薄肉曲面構造体の振動問題に対する最適フリーフォルム創成システムの開発

(a) 固有振動問題に対して、指定したモードの固有値の最大化、振動モードのコントロールを目的に、

- ① 固有振動方程式を制約条件に加えた分布系（無限自由度系）最適化問題を定式化し、形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。このとき理論上問題となる重根問題の解決も図った。更に、リブで補強されたシェルのリブの形状決定についても感度関数を導出した。また、関連する静的問題に対しても感度関数を導出した。
- ② 得られた感度関数を基にシェル形状を変動させるためのアルゴリズム、プログラム、及び汎用システムを開発した。これはこれまで開発してきた剛性問題のシステムを改良しながら行った。
- ③ 各設計問題に対し、基本的な例題の数値実験を行い、最適な曲率分布が得られるかを確認した。
- ④ 実際の自動車構造や建築構造のデザインへ適用し、実用性を検証した。
- ⑤ 初期と最適化後の形状を3Dプリンターで試作した。

(b) 周波数応答問題に対して、指定した周波数（帯）での振幅最小化を目的に、

- ① 周波数応答方程式を制約条件とした分布系（無限自由度系）最適化問題を定式化し、形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。
- ②～⑤：(a)と同様の手順で進めた。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

(2) 薄肉曲面構造体の構造-音響連成振動問題に対する最適フリーフォーム創成システムの開発

(a) シェルで囲まれた閉空間における周波数応答問題に対して、指定した周波数(帯)での音圧最小化を目的に、

- ①(1)の振動問題を発展させ、シェル-音響連成方程式を制約条件に加えた分布系(無限自由度系)最適化問題を定式化し、形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。
- ②得られた感度関数を基にシェル形状を変動させるためのアルゴリズム、プログラムを開発し、(1)で開発した汎用システムに組み込んだ。
- ③基本的な例題の数値実験を行い、最適な曲率分布が得られるかを確認した。
- ④実際の自動車構造や建築構造のデザインへ適用し、実用性を検証した。

(b) シェルの振動による開空間への放射音の周波数応答問題に対して、指定した周波数での振幅最小化を目的に、

- ①(2)-(a)の閉空間問題を開空間問題へ発展させ、シェル-音響連成方程式(ゾンマーフェルトの放射条件を考慮)を制約条件に加えた分布系(無限自由度系)最適化問題を定式化し、形状変動に対する感度関数を理論的に導出した。
- ②~④:(a)と同様の手順で進めた。

3. 研究の結論、今後の課題

薄肉曲面構造体の振動問題(固有振動問題, 周波数応答問題)と構造-音響連成振動問題(開空間と閉空間における周波数応答問題)に対して, 最適な自由曲面形状を創成するための形状最適化手法を構築し, 自動設計のための汎用的で実用的な最適化システムを開発した. 本手法はこれまでの形状最適化問題に潜在した Jagging 問題と設計自由度低減の問題, 計算効率の問題を同時に解決できる方法である. 分布系(無限自由度)の形状最適化問題として定式化し, 感度関数を理論的に導出し, 関数空間の勾配法で形状を決定することで上記の問題を解決し, 滑らかで力学的に自然な無限自由度の曲面を容易に創成することを可能にした. 開発した設計支援最適化システムにより, 設計者は経験に頼ってきた形状のパラメータ化を必要とせず, 荷重や拘束条件に応じて, 振動特性や音響特性をコントロールするための最適な局所的なビード分布や全体形状を創り出すことができる.

今後は開発した振動と騒音問題に対する設計支援システムを更に発展させ, 過渡応答問題や複合材料からなる構造体への応用, ミクロ構造-マクロ構造のマルチスケール問題に対する解法を開発し, 本システムへ実装していく. また,心地良い音創りや楽器の設計への応用も検討していく.

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

デザイナーや設計者, 研究者がシェルや膜の初期形状を与えれば, 軽量で最適なフォルムを返す最適フォルム決定のためのデザイン支援システムとなる。種々の工業製品に幅広く含まれるシェルや膜構造のデザインへの適用が可能であり, システムの利用により短時間で効率的な開発が実現される。また, これまでデザイナーや設計者の経験や勘に依存してきた曲面構造体のフォルムを理論的に裏付けのあるものとし, 新たなフォルムの創成も可能となる。更に, デザイン制約条件を変更しながら, 計算機による素早いレスポンスでの最適なフォルムの試行解析が可能となるため, 知識や経験の少ないデザイナーやエンジニアに対しての学習支援システムともなる。社会問題にもなりつつある技術伝承の問題に対する一助ともなる。

2. 学術的価値

これまでパラメトリックな手法による有限次元空間での理論で妥協していたシェルのフォルムデザインに対し, 関数空間での理論を展開することにより, 任意の曲率分布(無限自由度)のデザインを可能にした。力学的, 数学的に証明された無限自由度の曲面のデザインが可能となる理論とシステムであり, 止まっていたこの分野の研究に一石を投じる先進的な手法とシステムの提案である。薄肉デザインの必須条件である膜力伝達構造が容易に生成され, 構造力学の観点からも非常に意義ある成果となる。薄肉構造の振動・騒音の新たな理論とシステムの研究は曲面の研究に関係するデザインと情報工学, 構造力学及び応用数学分野と深く関わっている学際的な研究に位置づけられ, 更に, 幅広い分野への応用も期待される。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

<学術論文>

- (1)劉陽, 下田昌利, 薄板構造の固有振動問題に対する自由境界の形状最適化手法, 日本機械学会論文集(A編), 79 巻 805 号 (2013-9), pp. 1340-1353.
- (2)下出健介, 下田昌利, 放射騒音低減を目的としたシェル構造のノンパラメトリック形状最適化, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.810(2014).
- (3)劉陽, 下田昌利, 目標変形モードに対する自由曲面シェルの形状同定手法, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.811(2014).
- (4)下田昌利, 下出健介, 閉空間の音圧低減を目的としたシェル構造のノンパラメトリック形状最適化, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.813(2014).
- (5)Y. Liu and M. Shimoda, Non-parametric Shape Optimization Method for Natural Vibration Design of Stiffened Shells, Computers and Structures, Vol. 146 (2105), pp. 20-31.
- (6)M. Shimoda and Y. Liu, Free-Form Optimization of Thin-Walled Structure for Frequency Response Problem, Shock and Vibration Volume 2015, Article ID 471646 (2015), 11 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/471646>.
- (7)M. Shimoda and Y. Liu, Parameter-free Shape Optimization Method for Vibration Problems of Free-form Shells, Thin-walled Structures (submitted).
- (8)M. Shimoda, K. Shimoide, J. X. Shi, Structural-acoustic Optimum Design of Shell Structures in Open/closed Space Based on a Free-form Optimization Method, Journal of Sound and Vibration (submitted).

<講演論文>

(1)下出健介, 下田昌利, 開空間における騒音低減を目的としたシェル形状最適化, 日本機械学会 第 23 回設計工学・システム部門講演会・2013.10.23-25(沖縄).

(2)劉陽, 下田昌利, 固有振動問題に対する補強リブ付きシェル構造の形状最適化手法, 日本機械学会 第 23 回設計工学・システム部門講演会・2013.10.23-25(沖縄)

<口頭発表>

(1)M. Shimoda and K. Shimoide, A Non-Parametric Free-form Optimization of Shell Structures for Reducing Radiated Noise, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), July 20 - 25, 2014, Barcelona.