



Title	微分幾何学に基づく可展面設計の計算機支援に関する研究
Author(s)	吉田, 皓太郎
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88047
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (吉田 皓太郎)	
論文題名	微分幾何学に基づく可展面設計の計算機支援に関する研究
論文内容の要旨 本論文は、円柱や円錐の側面部などに見られる可展面の設計支援を行うことを目的として、設計要求に合わせた可展面形状およびその展開形状を同時に設計する手法を提案した。 第1章は、緒言であり、CADシステムの概観から、可展面設計に関する現状の研究、および、本研究の活用分野について述べた。可展面設計の計算機支援においては、曲面の展開性を考慮した形状モデルが確立されていない点、展開可能性を考慮しながら、設計要求に合わせて設計する手法の構築が行われていない点が課題であると言及した上で、こうした課題の解決に向けた研究の目的および、本論の構成について示した。 第2章では、第3章以降で述べる手法の基礎となる、局所座標系に基づく空間曲線の表現方法と、曲面の基本形式やガウス曲率などの、曲面の微分幾何学に関する基礎理論を概説し、それを利用した先行研究として、2次元形状を曲線に沿って貼り合わせる際に出来上がる可展面形状を導出する手法および、2つの境界曲線間を与えた場合における可展面およびその展開形状を導出する手法について述べた。その上で、これらの手法は可展面の3次元形状と展開形状を定量的に相関づけるモデルとして有効であるとした一方、形状の導出を行うためには制約付き変分問題を解く必要がある点から、設計要求に合わせて設計を行う場合における、手法の適用可能性の限界について述べた。 第3章では、第2章を受けて境界曲線間に可展面が形成される場合の幾何学的条件について述べた上で、形状制約に基づく可展面設計手法について述べた。定式化した幾何学的条件によって、境界曲線間に形成される曲面を、最適化を用いることなく求める手法を構築した上で、曲面の通過する点を与えた場合における、可展面設計問題を、最適化問題として定式化した。本手法に関する実験として、設計された展開形状から実際に紙模型を作成し、3次元形状をどの程度再現しているかについて検討を行った。第4章以降では、第3章を踏まえた上で、実際の設計要求に対しての設計支援手法について述べた。 第4章では、形状の修正設計に着目し、その手法について述べた。要求される形状情報の変更に対し、曲面の修正作業が微分方程式を制約に含む制約付き変分問題で記述できることを述べた上で、その問題を直接解かずに、定式化した微分方程式の特殊解を用いて、有限の操作で局所修正を達成する形状修正アルゴリズムについて提案した。数値計算例では、2つの可展面に対して本手法を適用し、計算時間や得られた解についての考察を行った。 第5章では、与えられた点群形状に基づく設計に着目し、その支援手法について述べた。はじめに、点群と曲面の誤差の導出を、幾何学的条件に基づき計算する手法を述べた。その上で、複数枚の曲面により点群を近似することを考え、曲面の誤差評価領域に基づき、点群を分割する手法について提案した。こうして、点群を最も近似する可展面設計問題を、最適化問題として定式化する手法について述べた。数値計算例では、3つのケースの点群に本手法を適用し、得られた形状や曲面との誤差分布に対して考察を行った。 第6章では、性能設計に対し回帰モデルを用いて支援することを考え、形状に対する性能値を予測する手法、および性能値から形状設計を行う手法について述べた。前者では、微分幾何学に基づく特徴量とガウス過程回帰手法を組み合わせた回帰モデルの構築を行っており、後者では、その手法を用いた形状設計手法について述べた。数値計算例では、モデル化された製品の性能値やFEMによる解析結果に基づいた性能値に対して回帰手法を適用し、その回帰精度に関する妥当性の検討を行った他、設計手法により設計した曲面が、どの程度性能値を再現しているかについての考察を行った。 第7章では、各章で得られた結論を総括した上、本手法の適用可能性および今後の課題や展望について述べた。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (吉 田 皓 太 郎)				
論文審査担当者	(職) 氏 名			
	主 査	准教授	若 松	栄 史
	副 査	教授	平 井	慎 一 (立命館大学大学院理工学研究科)
	副 査	教授	福 本	信 次
	副 査	教授	倉 敷	哲 生
	副 査	准教授	岩 田	剛 治

論文審査の結果の要旨

本論文において対象とする可展面とは、円柱や円錐の側面部等に見られる、伸縮させることなく平面に展開できる曲面を指し、造船や建築、服飾分野等に広く使用されているものである。近年、製品の設計は CAD システムの導入によって大幅な効率化が図られている。特に、自由曲面に関しては表現手法が確立され、設計者が意図するような曲面を、計算機上で容易に設計することができる。しかし、可展面の設計においては、①「伸縮させることなく平面に展開できる」という性質を数学的に取り扱うことが困難である点、②実際の製造においては、板材から切り出した後に屈曲させて曲面を形成するため、切り出す際の展開形状が重要となるが、それを曲面と同時に設計することが困難である点、により、計算機による支援が進んでいない。本論文では、こうした課題の解決に向けた手法を提案している。その成果を要約すると以下の通りである。

(1) 局所座標系に基づく空間曲線の表現方法と、曲面の基本形式やガウス曲率などの、曲面の微分幾何学に関する基礎理論に基づき、①2次元形状を曲線に沿って貼り合わせる際に出来上がる可展面形状を導出する手法、②2つの境界曲線を与えた場合における可展面およびその展開形状を導出する手法、について提案している。これらの手法は、可展面の3次元形状と展開形状とを定量的に相関付けるモデルとしては有効であるが、形状導出のためには制約付き変分問題を解かなくてはならず、相応の計算時間が必要となることから、計算機によるリアルタイムな曲面設計という観点からは、適用性に限界があることを示している。

(2) (1) で示した限界を解決するために、境界曲線間に可展面が形成される場合の幾何学的条件を示した上で、形状制約に基づく新たな可展面の設計手法について提案している。具体的には、定式化した幾何学的条件によって、境界曲線間に形成される曲面を、最適化計算を行うことなく求める手法を構築している。その上で、曲面が通過する点を与えた場合における可展面設計問題を、新たな最適化問題として定式化している。

(3) (2) で提案した手法に基づき、形状の修正設計における計算機支援について提案している。具体的には、まず、要求される形状情報の変更に対し、曲面の修正作業が微分方程式を制約に含む制約付き変分問題で記述できることを示している。次に、この変分問題を直接解くことなく、定式化した微分方程式の特殊解を用いることで、有限回の操作の繰り返しで局所修正を効率的に達成する形状修正アルゴリズムを提案している。

(4)(2)で提案した手法に基づき、与えられた点群から可展面を設計する場合の支援方法について提案している。具体的には、まず、点群と可展面との誤差を幾何学的条件に基づき導出する手法について提案している。次に、複数枚の可展面により点群を近似する場合に、曲面の誤差評価領域に基づいて点群を分割する手法について提案している。その上で、点群からの誤差が最も小さくなるような可展面の設計問題を、最適化問題として定式化する手法について提案している。

(5)(2)で提案した手法に基づき、可展面の形状と関連する性能の設計を、回帰モデルを用いて支援する方法について提案している。この支援のためには、①形状に対する性能値を予測する手法、②性能値から形状設計を行う手法、が必要となると考え、①については、微分幾何学に基づく特徴量とガウス過程回帰手法を組み合わせた回帰モデルの構築手法を提案している。②については、得られた曲面の特徴量から可展面を逆生成する手法を提案している。また、実際の製品に対して提案手法を適用し、回帰精度に関する妥当性の検討を行うと共に、逆生成された可展面が、要求された性能値をどの程度再現しているかについて考察している。

以上のように、本論文は、微分幾何学という数学的観点に基づき、境界曲線が与えられた場合に、「伸縮させることなく平面に展開できる」ことが保証された可展面と、その展開形状を実用的なレベルで導出する手法を提案している。それだけでなく、(3)のように、可展面を局所修正する場合の効率的手法、(4)のように、与えられた点群に最も近くなるような可展面を導出する手法、(5)のように、形状とは関連するものの、陽には表現されない性能を満たすような曲面を効率的に生成する手法等、可展面の設計における様々な状況を考慮し、それに対して、同じ理論的枠組みに基づいた各支援手法を提案しており、今後、計算機による可展面の設計支援に対して多大な貢献を与えるものであると考える。

よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。