

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 2 月 7 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06971

研究課題名(和文) 曲面幾何に基づく曲面変形装置の基礎的動作手法に関する研究

研究課題名(英文) Research on fundamental algorithm of mechanical surface transformation based on geometric theory

研究代表者

松尾 宏平 (Matsuo, Kohei)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00399528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：任意の曲面から任意の曲面へ曲面形状を自在にコントロールするための幾何学的手法の理論構築を行った。具体的には、曲面上の曲率線格子を想定し、格子を構成する各点に、長さ方向伸縮、法線方向面外曲げ、面内曲げの3成分を与えて目的の曲面を得る理論体系を構築した(ねじりを与えずに曲面を成形するのがポイントである)。また、その理論を実装した曲面変形システムを開発した。システムでは、変形を与える順番や変形の刻み幅を任意に変えることができ、変形がどのように進展するのかをグラフィカルに確認できる。更に、曲面変形装置のデモ機を製作し、曲面変形システムと接続して実際の曲面変形の動作を確認できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

曲線格子に、長さ方向の伸縮、曲面に対する法線方向の面外曲げ、それに直交する面内曲げを与えることによって任意の曲面形状を得るアルゴリズムを開発した。これを仮に、曲面上の曲率線格子ではない、任意の曲面上の格子で行う場合、面外曲げ、面内曲げ、伸縮の他、ねじりを与える必要があり変形が複雑になる。曲率線格子を考慮することで、成形に伸縮と2軸方向の曲げ成分だけで対応でき、機械的な実用化が容易になる。将来的には、この理論を機械装置として船舶等を実装することで、その時々状況に応じて最適な形状にコントロールする、Transformable Ship等の実現を目指し、船舶、鉄道等の省エネ技術に貢献する。

研究成果の概要(英文)：A geometrical theory to control the shape of a curved surface from arbitrary shape to arbitrary shape is developed. Specifically, a theoretical system is developed to obtain a desired surface by giving three components, namely, expansion and contraction in the longitudinal direction, out-of-plane bending in the normal direction, and in-plane bending, to each point of lines of curvature. The important point is to form a curved surface without giving any torsion. A software that implements the theory is developed in this study. The order in which the deformation is applied and the incremental width of the deformation can be changed arbitrarily, and how the deformation progresses can be confirmed graphically in the system. In addition, the actual mechanical device is manufactured for demonstration purposes. By connecting the device to the software, we can confirm the actual curved surface deformation operation.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：曲面幾何 曲率線 スマートマテリアル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

松尾¹⁾は、曲面幾何に基づく曲面の成形手法に関する研究開発に取り組んでおり、曲面上の曲率線に基づく「曲率線展開法」という曲面展開法及び曲面成形法を開発し、それを実際の造船現場で実用化し、生産性を向上させるなどの成果を上げていた。

曲面の任意の点における法曲率には最大値をとる最大主曲率と最小値をとる最小主曲率が存在し、それらの方向(主方向)は互いに直交する。接線方向が常に最大主曲率方向あるいは最小主曲率方向と一致するような曲線を曲率線と言う。曲率線は曲面に対する法線がその進行方向に沿ってねじれない唯一の曲線で、その性質から曲面に対する法線方向とそれに直交する面内方向の2軸の曲げ成分のみで、平面上の同じ長さの直線から目的の曲面の曲率線に変形することができる。曲率線展開法はこの曲率線の幾何学的性質を利用して、造船における最適な曲面展開及び曲面成形を実現したものである。つまり、目的の曲面の曲率線格子に対応する展開図上の格子に、法線方向曲げ(製造現場ではプレス曲げで加工)と面内収縮(製造現場では鋼板へのガス加熱で加工)を与えることで、双方に干渉なく曲面成形ができる。

本研究はこの考えを拡張、一般化するもので、任意の曲面から任意の曲面への変形過程について研究した。任意の曲面上を覆う曲率線格子を構成する各曲率線の各点に対して、曲線の長さ方向の伸縮、曲面に対する法線方向の面外曲げ、それに直交する面内曲げを適切に与えれば、その格子が目的曲面の曲率線格子となり、任意の曲面形状が得られることになる。これを仮に、曲面上の曲率線格子ではない、任意の曲面上の格子で行う場合、各点に面外曲げ、面内曲げ、伸縮の他、ねじりを与える必要があり変形が複雑になる。曲率線格子を考慮することで、目的曲面の成形に伸縮と2軸方向の曲げ成分だけで対応でき、機械的な実用化が容易になるとともに、曲面の変形過程(途中の曲面の変形ステップ)の幾何学的な最適化(最短の経路を採る変形過程等)にも期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、任意の曲面から任意の曲面へ曲面形状を自在にコントロールするための幾何学的最適手法の理論構築を行うものである。将来的には、この理論を機械装置として船舶等に実装することで、その時々状況に応じて最適な形状にコントロールする、Transformable Ship等の実現を目指し、船舶、鉄道等の省エネ技術に貢献する。

研究は曲面の幾何学的考察に基づいて行う。具体的には、曲面上を覆う格子を想定し、その格子を構成する各曲線の各点に、長さ方向伸縮、法線方向面外曲げ、面内曲げの3成分のみを与えて任意の曲面を得る理論体系を構築する(ねじりを与えずに曲面を成形するのがポイントである)。

3. 研究の方法

(1) 任意の曲面上曲率線格子 目的の曲面上曲率線格子への幾何学的変形理論の構築

初期条件として与えた任意の曲面上曲率線格子の各点に(伸縮量 d 、法曲率変化 Kn 、測地的曲率変化 Kg)の3要素を与え、目的の曲面を得るための幾何学的必要量を算出する手法を確立する。

(2) 提案手法に基づく曲面成形のシミュレーション

目的の曲面形状を得るための3要素(d 、 Kn 、 Kg)が決定されたとしても、それをどのような順番で与えるかによって、目的形状までの成形過程(途中の曲面形状)が変わりうる。3要素を様々なパターンで連続的に変化させることで、様々な成形過程をシミュレーションする。シミュレーションは、連続的な変形過程をいくつかのステップで離散化し、各ステップでの形状を逐次求めることによって行う。

(3) 提案手法に基づく曲面成形の最適変形プロセスの解明

変形過程を定量的に評価する手法を構築し、それによって最適な変形プロセスの決定が行えるようにする。変形過程の定量的評価として、曲面成形過程における総移動量、総内部歪み量、総弾塑性エネルギー量等について検討する。変形過程の定量化から、様々な想定の下で、どのような変形プロセスが最も適しているかを系統的に決定する手法について検討する。例えば、最もエネルギー効率が優れる成形プロセスとしては総弾塑性エネルギーが最小のもの、最も短時間で成形できるプロセスとしては総移動量が最小のものというように、利用想定に応じた最適な変形プロセスについて整理する。

(4) 曲面成形プロセスのシミュレーションソフトの開発

提案手法に基づく曲面成形プロセスのシミュレーションを簡易に行えるソフトウェアを開発する。具体的には、目的曲面形状を入力すれば平面矩形形状からの変形3要素(d 、 Kn 、 Kg)を計算し、様々な成形プロセスをシミュレーションするシステムを開発する。変形の様子をアニメーションなどで確認することができ、成形プロセスごとの評価パラメータを算出して、どの成形プロセスが目的に応じて最も適しているかを提案する機能をつける。

(5) 曲面コントロールデバイスのコンセプト設計

将来的な実現を目指して、曲面を自在にコントロールできる曲面変形装置のコンセプト設計を行う。コンセプト設計は曲面が格子構造で構成されていることを想定し、その格子を構成する曲線に対して伸縮と2軸方向の曲げを与えることで任意の曲面に変形させる機械装置について検討を行う。制御システムを介して、上記(4)で開発したシミュレーションソフトと曲面変形装置を接続する。伸縮と2軸方向曲げが可能となる機構、機械装置の試設計を行う。

4. 研究成果

(1) 曲率線操作による曲面変形理論の構築

初期条件として与えた任意の曲面上曲率線格子の各点に対して、目的曲面を得るために必要な変形3要素(伸縮量 d , 法曲率変化 K_n , 測地的曲率変化 K_g)を計算する手法を確立した。具体的には、初期曲面と目的曲面の曲率線格子の対応付けを行い、対応する曲率線同士の(曲線長 S , 法曲率 K_n , 測地的曲率 K_g)の差から、与えるべき変形3要素(d , K_n , K_g)を計算し、それらを各点に与えることで目的曲面に変形する。ここでの重要な検討事項は曲率線格子同士の対応付けの問題である。理論上、曲率線格子は変形3要素を与えればあらゆる曲率線格子に変形できる。つまり、曲率線格子同士の対応付けに任意性があるが、無計画に曲率線格子同士を対応付けすれば、結果として非効率な曲面変形となる。このため、曲率線格子間の距離差が最小化となるもの等、適切な曲率線格子同士の対応付けについて研究を行い、適切な曲率線格子の対応付けの問題(より具体的には、目的曲面上に無数に引ける曲率線格子から、どの曲率線格子を選べばよいかの問題)に関して基本アルゴリズムの構築を行った。

(2) 曲面変形システムの開発

曲率線を操作することで、初期の曲面 目的の曲面に変形できるシステムを開発した。具体的には、初期曲面と目的曲面の曲率線格子の対応付けを行い、対応する曲率線同士の(曲線長 S , 法曲率 K_n , 測地的曲率 K_g)の差から、与えるべき変形3要素(d , K_n , K_g)を計算し、それらを与えることで目的曲面に変形できるシステムを開発した。システムでは、変形3要素を与える順番や変形の刻み幅を任意に変えることができ、それによって変形がどのように進展するのか(変形過程)を観察することができる。システムはグラフィカルインタフェースを有し、変形の前々それぞれの曲面の様子を分かり易く確認することができる。また、システムは変形ごとにその変形を評価する評価指標(総移動量等)を出力する。このことはどの変形過程が適切であるかを判断する参考情報となるが、本研究期間中に最適な変形過程を自動出力するシステムまでは構築できず、これについては今後の課題とする。

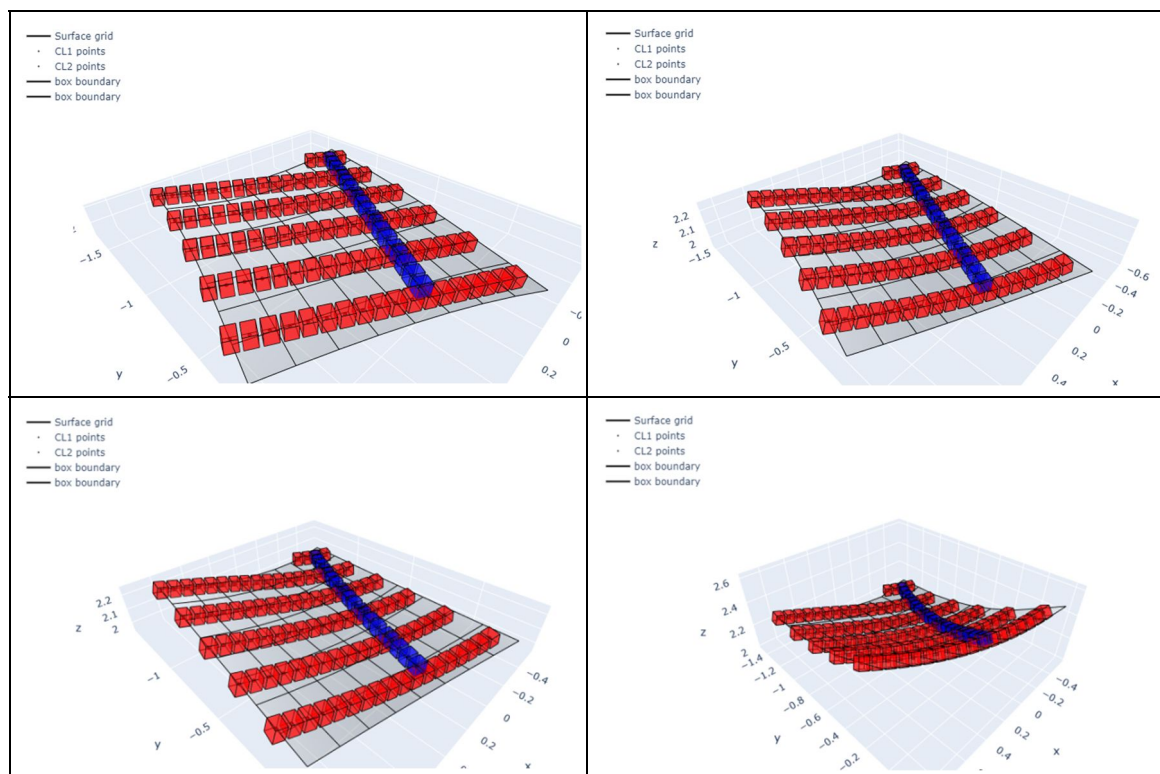


図 曲面変形システムの様子

(3) 曲面変形装置の製作

曲率線を操作して曲面全体を変形させる実機のコンセプト設計のため、曲面変形装置のデモ機を製作した。曲面変形装置全体は基本単位であるユニット部を複数個接続することで構成さ

れる。各ユニット部には曲面の局所ごとの法曲率と測地的曲率をコントロールするためのサーボモータが内蔵されている。

上記(2)の曲面変形システム(ソフトウェアに相当)を曲面変形装置に接続し、曲面変形システムから現在曲面 目的曲面に変形するための変形要素 (K_n , K_g) を曲面変形装置に指示する(なお、本来であれば、任意の曲面への変形には変形要素として伸縮 d も付与すべきであるが、機械的制約上、本研究では曲率変化の2要素のみをコントロールすることとした)。具体的には、変形要素を回転角度として各ユニット部のサーボモータに与える。また、製作した曲面変形装置の仕様(変形を与える位置の指定、サーボモータ等による機械上の制約等の指定)に対応するように曲面変形システムをカスタマイズした。

曲面変形システム及び曲面変形装置による実際の変形動作を確認することで、曲率線による曲面変形の機械的性質を評価した。特に、船舶等の実際の製品として搭載する場合を想定し、設計上の仕様に関する基礎的な情報(重量、サイズ、サーボモータの最大出力、動作速度、ユニット構成、変形量、可動範囲、機械への信号の伝達方法等)について検討を行った。

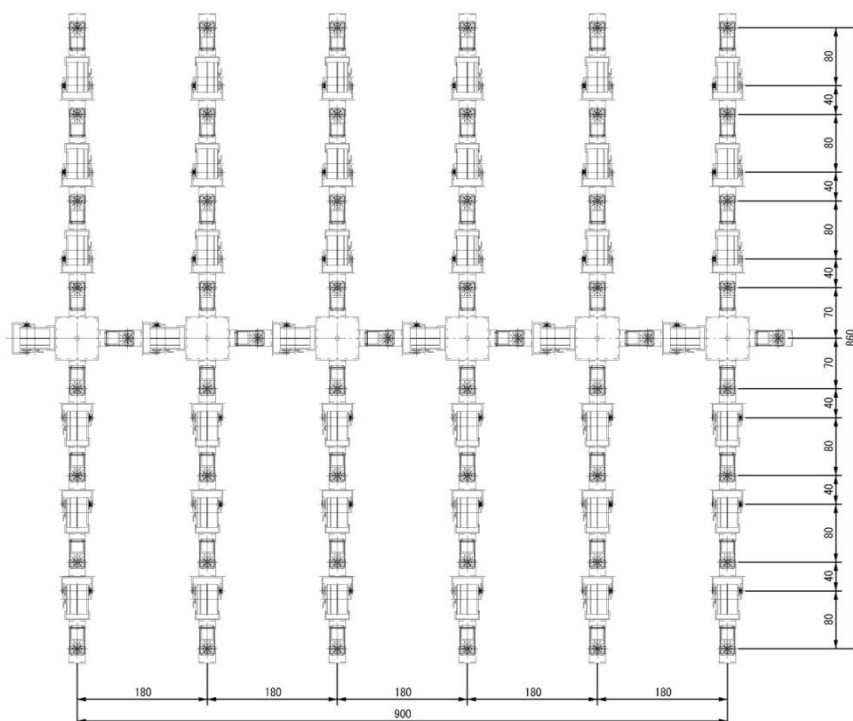


図 曲面変形装置デモ機の全体構成図



図 ユニット部の様子(法曲率を調整するモータと測地的曲率を調整するモータが付いている)

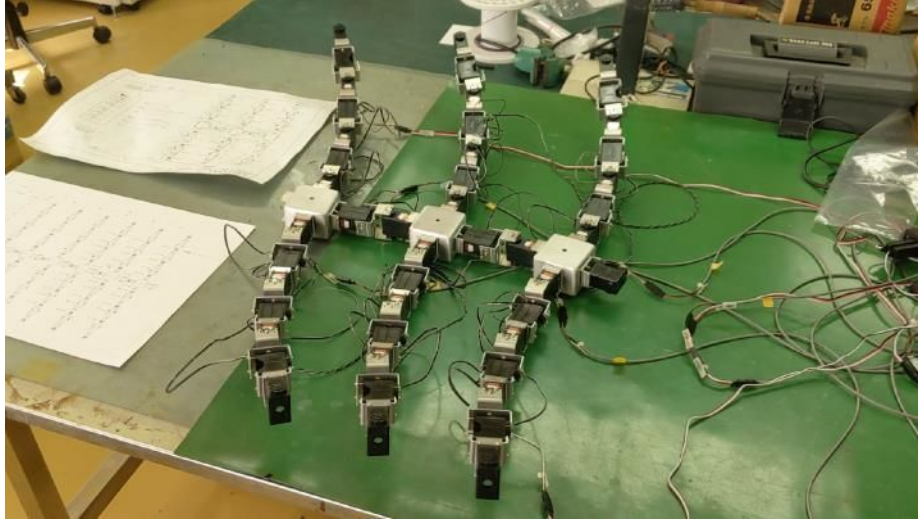


図 曲面変形装置（一部）の動作の様子

<引用文献>

- 1) 松尾宏平、松岡一祥、船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発、日本機械学会論文集 C 編、76 巻、771 号、2010、2797-2802

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------