

論文の内容の要旨

論文題目 Cylindrical Stripモデルによる自由曲面離散化手法に関する研究

氏名 水谷 圭佑

本論文は、建築工学における自由曲面のパネリング問題において、柱面パネルを用いたパネリング法についてまとめたものである。特に、曲面の離散化に基づく離散微分幾何学的アプローチとして、任意曲面の半離散モデルである Cylindrical Strip モデル(C-strip モデル)と柱面の離散モデルを組み合わせた新たなパネリング法を提案することが、本論文の主たる目的である。

曲面のパネリング問題は、使用するパネル材料やその製造方法に応じて生じる諸制約を満たすパネリング曲面を求めることで、コストや生産性に配慮した曲面の設計を行うことを目的とする。この問題に対して、さまざまなパネル材料や製造方法を想定したパネリング法がこれまでに提案されているが、製造工程で高価な型枠を要するガラスや GRC の曲面パネルを想定した効果的なパネリング法は少ない。これらのパネルを用いる場合、型枠の繰返し利用による効率的なパネル製造を行うことがコストや生産性の観点で有効である。型枠の繰返し利用を考慮したパネリング法として、必要となる型枠数を最適化変数とし許容誤差の範囲内で最小の型枠数を求める M.Eigensatz 等の方法やワインガルデン曲面の放物面近似を用いる D.Pellis 等の方法などがすでに知られているが、いずれの方法もパネル境界にギャップを生じる不連続なパネリング曲面しか求めることができない。この問題に対して、本論文では、限られた種類の円筒面で G^1 補間可能な一般柱面の離散モデルが存在することに着目し、これを任意曲面の半離散モデルとしてすでに存在が知られている C-strip モデルと組み合わせることで、型枠の繰返し利用とパネリング曲面の連続性を両立する新たなパネリング法を提案する。提案法によるパネリング曲面は、ユーザーが指定する種類数の円筒面から得られるトリムサーフェスのみで尽くされ、1 方向に G^1 連続、1 方向に G^0 連続なパネリング曲面であり、既往手法によるパネリング曲面と比較して連続性の観点で特に優れる。

本論文では、パネリング操作を「1.C-strip モデルの生成」と「2.C-strip モデルの分割・要素制限」の2つのステップで構成し、それぞれのステップで与えられた曲面を方向別に離散化する。ステップ1では、与えられた曲面を特定の共役座標系に従って半離散化することで C-strip モデルを求める。C-strip モデルは、H.Pottmann 等によってモデル化された Developable Strip モデル(D-strip モデル)に含まれるモデルであり、曲線間を線形補間することにより区分的滑らかな柱面となる。ステップ2では、C-strip モデルを構成する柱面を、ユーザーが指定する種類数(= k)の円筒面のみで G^1 補間可能な離散柱面へ変換する。ここで求める任意柱面に対する特殊な離

散モデルは、柱面準線の曲率の離散化を通して得られる。

本論文の第3章では、提案法ステップ2の基本となる一般柱面の離散モデルについて述べる。本章の目的は、一般柱面の離散モデルの中で限られた種類の部分柱面のみで G^1 補間可能な離散モデル(:= k -離散柱面モデル)が存在することを明らかにするとともに、その離散モデルを求める具体的な離散化手法を確立することである。ここでは、柱面の離散モデルの本質をその準線の離散モデルとし、平面曲線の離散モデルについて議論する。このとき、目的とする柱面の離散モデルを導く平面曲線の離散モデルの1つが、その曲率の離散化により得られることを示し、この離散モデルを補間する曲線が arc spline 曲線に一致することを示す。与えられた柱面準線からこの離散モデルを具体的に求める離散化手法として、arc spline 曲線による曲線の近似最適化問題を用いる方法を提案する。本手法は、与えられた柱面の k -離散柱面モデルの中で対象を最良近似する離散モデルを与える。

本論文の第4章では、提案法ステップ1について述べる。本章の目的は、与えられた曲面から C-strip モデルを求める方法を確立することである。まず、具体的な方法の提案に先立ち、C-strip モデルの微分幾何学的性質について議論する。ここでは、D-strip モデルとの幾何学的関係に関する考察を通して、C-strip モデルを導く共役座標系(:=柱面共役座標系)および対応する共役場(:=柱面共役場)を特徴付ける。ここで導かれた柱面共役座標系が、曲面の半離散モデルとしての C-strip モデルを改めて定義づけるとともに、新たな離散モデルとして Cylindrical メッシュを定義づける。これらの議論を踏まえて、本章では、C-strip モデルを求める方法として2つの方法 A・B を提案する。方法 A は、曲面上に任意に与えた曲線から柱面共役座標系を定め、数値積分によりアイソパラメータ曲線を求める方法である。この方法は、与える曲線が C-strip モデルの線織の流れに対応するため直感的で簡易な方法である一方で、与えた曲線が特異点を含む共役座標系を定めた場合に、曲面の極めて限定的な部分のみ被覆する C-strip モデルが得られるなど、その適用範囲に限界がある。方法 B は、C-strip モデルを求める代わりにその離散対応物である cylindrical メッシュを求める方法である。この方法は与えられた曲面を任意に離散化して得られる三角形メッシュ上に柱面共役場を生成し、柱面共役場に沿うメッシュの径数付けを求めることで cylindrical メッシュを求める方法である。離散系における柱面共役条件を制約条件とする最適化問題によりメッシュ上の滑らかな柱面共役場を求める。この方法は、特異点を含む柱面共役場も生成することが可能であり適用範囲が広いが、自己共役性から生じる特異点の定義やその扱いに関して課題が残る。

本論文の第5章では、提案法ステップ2について述べる。本章の目的は、与えられた C-strip モデルを構成するすべての柱面を k -離散柱面モデルへ離散化する方法を確立することである。ここでは、第3章で示す手法を拡張することで、C-strip モデルを構成するすべての柱面の準線を同時に離散化する方法を提案する。本方法では、arc spline 曲線による曲線の近似最適化問題に、線織の連続性や柱面間交線の滑らかさなど、C-strip モデルを構成する柱面間の幾何学的関係を組み込むことで、対象とする C-strip モデルを最良近似する離散モデルを求める。本方法が、 k 種類の円筒面のトリムサーフェスのみで尽くされる、1方向に G^1 連続、1方向に G^0 連続なパネリング曲面を与える。本章では、最後に、2つの解析モデルを用いた数値解析例を示し、D.Pellis 等が示した N 枚のパネルに対する型枠数の目安 $k \approx \sqrt{N}$ と同等の型枠数の条件下において、本手法の有効性を確認した。

本論文の結論は以下の通りである。

- 一般柱面の離散モデルをその準線の離散モデルにより定めたとき、準線の曲率の離散化を通して、円筒面で G^1 補間可能な離散モデルを生成することができる。また、この離散モデルは、離散点列数より少ない濃度 k の実数集合と準線の離散曲率との対応関係を収束条件下で定めることで、 k 種類の円筒面で G^1 補間可能な離散モデルとなる。
- 任意の柱面が与えられたとき、 k 種類の円筒面で G^1 補間可能な離散モデルで柱面を良く近似する離散モデルを、 k -means⁺⁺法や最適化問題を組み合わせることで求めることができる。
- C-strip モデルを導く柱面共役座標系が、D-strip モデルとの幾何学的関係から導かれ、この座標系が共役座標系に含まれることが確かめられる。また、同様の関係が方向場に関しても成り立ち、柱面共役座標系に対応する柱面共役場が共役場に含まれることが確かめられる。
- C-strip モデルを求める方法として 2 つの方法が考えられる。1 つは柱面共役場に沿う曲線を数値積分により求める方法、もう 1 つは離散対応する cylindrical メッシュを求める方法である。
- k 種類の円筒面で G^1 補間可能な柱面の離散モデルは、C-strip モデルに組み込むことが可能である。このとき、 k 種類の円筒面のみで構成される C-strip モデルで元の C-strip モデルを良く近似するモデルを、 k -means⁺⁺法や最適化問題を組み合わせることで求めることができる。

以上より、離散微分幾何学的アプローチに基づく本論文のパネリング法が、型枠の繰返し利用とパネリング曲面の連続性を両立しつつ、与えられた曲面を高い精度で実現可能であることが示された。本パネリング法により、現実的なコストや工期の範囲内で、滑らかで美しい自由曲面の実現が期待される。