

昆虫の曲面形態形成の原理に学ぶ工学

*森川健太郎 (京都大学工学研究科)

1. はじめに

自然界には、多様な曲面形状が存在する。特に、昆虫の角などの外骨格形状は、顕著に立体的で複雑な形状を示す。角が形成される頭部領域の形状は、幼虫の段階では単純で平坦に近いものであるが、蛹になる脱皮の際に、突如として立体的な角が現れる。この蛹化の過程では、幼虫頭部体内に予め形成された袋状の皺構造が、エアバッグを膨らませるように展開される。この形成様式の興味深い点は、展開して目標形状となるものを皺状に折り畳んだ状態で形成することである。皺構造の形成は、シート状の組織が細胞増殖で成長する過程である。形成の初期段階では、組織は幼虫の頭部に沿った平坦な形状をしているが、細胞増殖を通して立体的な角（が折り畳まれた皺構造）へと成長する。

本研究では、この形成様式について、二つの着眼点からその原理を理解し、工学応用の可能性を示す。着眼点の一つ目は、目標曲面形状を如何にして皺構造にエンコードするのかという皺の設計原理である。二つ目は、初期には平坦に近い形状の組織が、どのようにして曲面へと成長するのかという立体化の原理である。

2. 実験方法

本研究では、幾何学的な観点から曲面形態形成の原理を理解する。まず、皺の設計原理については、曲面形状を皺形状に写す変形の写像を構築する問題として定式化する。曲面と皺は、皺を伸ばすという操作で関係している。この伸びの変形は、皺の折り目を展開する方向にのみ起こり、折り目に沿った方向には伸びない。すなわち、曲面を皺に写す変形は、各点近傍での変形が一方向的であるという特徴を持つ。従って、この特徴を持つ写像を構築することで、曲面を皺にエンコードすることができる。

立体化の原理についても、変形の写像を構築する問題として定式化する。本研究では、立体形成過程において、細胞増殖頻度に空間的な偏りがあるという観察に基づき、成長率

の分布が曲面形状を決めると仮定した。この仮定の下では、成長前形状を成長後の曲面形状へ写す変形は、各点近傍の変形が面積変化率というスカラー量で特徴づけられる、等方的なものとなる。従って、成長前後の形状間に等角写像を構築することで、その変形を実現する面積変化率分布を得ることができる⁽¹⁾。

3. 結果

皺の設計原理のデモンストレーションとして、曲面形状データを用意し、それに対して皺設計の写像を数値的に構成した (図 1 A-1)。さらに、得られた皺構造を 3D プリントし、手で展開することで、目標曲面形状が得られることを確認した (図 1 A-2)。

立体化の原理についても、曲面形状データに対して等角写像を数値的に構成した (図 1 B-1)。さらに、得られた面積変化率分布を材料に実装することで、その面積変化によって目標曲面形状が得られることを確認した (図 1 B-2)。

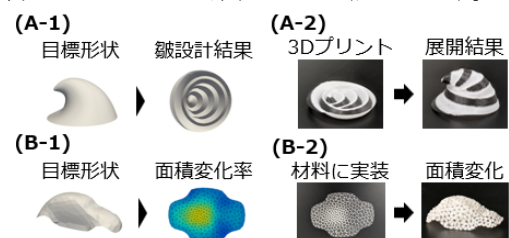


図 1 数値計算および物理実装の結果

4. 考察

立体的な曲面形状に対し、皺や平面の形状は、空間的なコストを下げることができる。この利点は、折紙工学のように宇宙や生体内での応用可能性を期待させる。本研究は、平面の折りで作りに得る可展面だけでなく、任意の曲率を持つ曲面を形成できる点で、新たな工学へつながることが期待される。

参考文献

(1) K Morikawa (2023) Journal of Theoretical Biology, 575, 11650.