

氏 名	渡辺 優香
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 9 2 7 0 号
学位授与年月日	令和元年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	システム情報工学研究科

学位論文題目	Modeling and Visualization of Curved Folding (曲線折り動作のモデル化と可視化に関する研究)
--------	---

主 査	筑波大学 教授	博士 (工学)	三谷 純
副 査	静岡大学 教授	Ph. D.	三浦憲二郎
副 査	筑波大学 教授	工学博士	工藤 博幸
副 査	筑波大学 准教授	博士 (工学)	滝沢 穂高
副 査	筑波大学 准教授	博士 (情報理工学)	金森 由博

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、曲線折りの設計と折り動作の可視化手法を提案したものである。曲線折りは、折り紙の技法の一種で、曲線状の折り線に沿って紙を折ることで、1枚の紙から立体的な形状を創り出すものである。この技法を用いた折り紙作品は数多く作成されているが、折る過程の紙の動きは明らかになっていない。これは、曲線に沿って紙を折る過程で、紙の湾曲方向が変化し得るため、形の自由度が極めて高いためである。このような問題はあるものの、曲線折りの折り動作のモデル化、可視化は、可展面と曲線からなる工業製品の製造方法や、折り動作を考慮した新たな曲線折りデザインの設計などには必須である。本論文では、曲線折りの設計と折り動作の可視化のための、設計支援ツールを試作した結果を示している。湾曲した紙の形状は、平面を伸縮なしに変形させてできる可展面であり、曲面内に湾曲方向と直交する ruling (線織面を構成する直線エレメント) と呼ばれる直線を含む。計算機上のモデルとしては、可展面は ruling に沿って分割した細い四角形で構成されるクアドストリップで表現され、1つの曲線折りは、折り線で接する2枚のクアドストリップの組み合わせで表される。提案された手法では、折り線の形状と折り角度に基づいて ruling の方向を算出し、紙の形状は折り線、ruling、紙の端によって張られた面の集合であるポリゴンモデルとして生成するものとしている。そのため、折り動作の過程で起こる紙の湾曲方向の変化、つまり ruling の方向の変化を正確に再現できる。提案システムにおいては、ユーザが紙面上の折り線形状、折った状態の3次元空間中の折り線形状、折り線の折り角度を操作することで、折り線形状や紙の形状を操作する。入力に従い折り線形状や折り角度が変化すると、それに伴い ruling の方向が修正され、ポリゴンモデルも更新される。入力によっては、ruling の交差や自己干渉など、現実の紙では起こらない状態が生成されるが、インタラクティブな操作により、ユーザがこのような状態を回避できる。このような

提案システムを用いて生成されたモデルに対して、形状の可展性および構成面の誤差の評価、および実物との外観の比較を行い、提案手法の有効性を示している。また、システムの操作性のおよび、紙の自己交差などについての課題が残されている点も示している。

審 査 の 要 旨

【批評】

1 枚の素材を折るだけで形を作る折り紙の技術は工学的にも有用であり、その形状設計についての研究は盛んにおこなわれているが、曲線での折りを扱った研究は少ない。一般に、折り紙による形状設計では幾何的な制約が厳しく、意図した形状を作ることは困難であり、その変形過程については未だ明らかになっていない点も多い。本論文にまとめられた研究では、このような曲線折りを含む折り紙の形状設計および折り過程の可視化を実現するシステムの開発を行い、その評価を行っている。提案システムでは、折り線や曲面の滑らかさを保ちつつ、インタラクティブに操作できる GUI を有し、少数の代表点で曲率、捩率等をユーザが操作することができる。それらの値はスプライン補間されるため、折り線や曲面の形状が滑らかになることが保証される。入力値はユーザにとって直感的ではないが、操作が即座にモデル形状に反映されるため、インタラクティブに調整できることを示している。また、入力に基づき随時、ruling (線織面を構成する直線エレメント) を算出し、その結果をポリゴンデータに反映させることで、紙の湾曲方向の変化に対応した折り動作を生成することを実現している。提案手法では既存の曲面に折り線を追加する場合、曲線パラメータを直接操作できず ruling の調整が難しいが、コスト関数に基づく入力制約および最適化による調整で操作性を向上させている。また、複数の折り線をもつ回転対称な曲線折りの折り動作のモデル化を、折り線 1 本の単純なピースを回転対称に並べることで実現した。これは、ピース間の微小な隙間を許容することで実現している。今後の課題としては、直感的な入力方法の確立、同じ曲面上にある 2 本の折り線の形状の調整、折り動作のバリエーション生成、実物の撮影・計測データに合わせたモデル変形、干渉計算、回避機能の追加などが挙げられる。本研究によって、曲線折りを含む形状と、その変形過程のモデル化と可視化手法が提案されたことで、従来のアプローチでは困難であった曲線を含む折り紙の工学分野への応用への可能性が大きく拡張されたものと言える。以上のように、本論文では新規性・有用性が認められる複数の手法が提案され、博士論文として十分な内容を擁していると判断できる。

【最終試験の結果】

令和元年 7 月 22 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。