

氏名	ふえん しゅうめい Feng Xuemei
本籍(国籍)	中国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第18号
学位授与年月日	令和5年 9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科デザイン・メディア工学専攻
学位論文 題目	Research of Spherical Style Deformation on Single Component Models (単一コンポーネントモデルの球状変形に関する研究)
学位審査委員	主査 教授 松山 克胤 副査 教授 今野 晃市 副査 教授 齊藤 貢

論文内容の要旨

Stylization of 3D models refers to the techniques of deforming the input model with desired style. However, 3D geometric style transfer is still a challenging research topic, due to the complexity of geometries. One of the core technologies of 3D stylization is the establishment of the mapping relationship between the input model and the style model (or the style operator). Currently, a simple and easy-to-understand stylization method is to style the input model, while maintaining the topological connection of the input model. However, currently this approach mostly stylizes the input model into a polyhedron style.

We call the smooth, rounder, and curved surface style as spherical style. In 3D world, spherical style surfaces are familiar especially toy models and animation characters, such as Doraemon. In this thesis, we present a spherical style deformation algorithm on single component models. Our algorithm can deform models in a simple way. Given a single component model, the algorithm can deform the model with spherical style, while preserving local details of the original model. Because 3D models have complex skeleton structures that consist of many components, the deformation around connections between each single component is complicated, especially preventing mesh self-intersections. To the best of our knowledge, we could

not find not only methods to achieve a spherical style in a 3D model consisting of multiple components but also methods of a single component.

In this thesis, we focus on spherical style deformation on single component models and propose a method which deforms the input model with the spherical style, while preserving the local details of the input model. An energy function has been defined which combines ARAP term and spherical feature term. ARAP energy is one popular shape deformation method with constraints, which can preserve local details of the input shape. We explore a cluster of linear features of the sphere shape and define these features as l_2 -regularization. Due to linear spherical features, the optimization can be solved efficiently by local and global optimization strategy. We have performed our algorithm on convex and smooth models, convex and sharp models, finally complex models with different linear spherical features respectively. In our experiments, energy can be well converged. Based on these experimental results, we analyze the effect of each feature on deformation and achieve a most suitable feature for spherical style deformation on single component models. Our spherical style deformation approach can deform the input model smooth, rounder and curved, while preserving local structures of the original input model. At the same time, we showed deformation results of different sphere center positions. Our algorithm was also compared with the 3D geometric stylization method of normal-driven spherical shape analogies and confirmed that our method successfully deforms models smooth, rounder, and curved. Finally, limitations and problems of our algorithm based on the experimental results are also discussed.

We also observed that the results of our deformation are dependent on the quality of the input mesh. When the input mesh consists of regular triangles, above approach can achieve spherical style deformation. However, when the input mesh consists of many obtuse triangles, it leads to potential oscillation of the numerical method, poorly conditioned matrices, worsening the speed and accuracy of the linear solver and above spherical style deformation method fails. To solve this problem, we propose an optional deformation method based on convex hull proxy model as the complementary deformation method. Firstly, our proxy method constructs the proxy model of the input model using Poisson-disk sampling algorithm and Ball-Pivoting algorithm. Then establish the mapping relationship between the input model and its proxy model by projection method. Next, apply our above deformation method to the proxy model, and achieve the deformed proxy model. Finally,

deform the input model by interpolation of the input model and the deformed proxy model using the projection mapping relationship. Given a model with obtuse triangles, the proxy deformation method can get smoother and better result, compared with above direct deformation approach. In our experiments, interpolation parameter can be also expressed as a function, and different spherical style deformation results have been shown with different functions. Finally, we also discuss the limitations of this proxy deformation method.

論文審査結果の要旨

本論文は、コンピュータグラフィックスの分野における、3次元形状の変形に関する論文であり、単一コンポーネントの3次元モデルに対して、形状のディテールを保持したまま、全体を球形状に変形する手法を提案している。

3次元形状の変形に関する既存技術には様々なアプローチが存在するが、本論文では、複雑な操作を必要としない変形を追求する目的から、最適化を用いた変形を行うアプローチを採用している。最適化に基づくアプローチは、エネルギー関数の最小値を求めることで形状の変形を達成するものである。本研究では、入力形状のディテールをできるだけ維持するために、As-Rigid-As-Possible (ARAP) の概念を導入している。それに加えて、全体を球形状に変形するために、球形特徴量を定義し、ARAP と球形特徴量との線形和でエネルギー関数を定義することが述べられている。本論文では、はじめに、球形特徴量の直感的な説明とその定義を行っている。しかし、ここで定義された特徴量は、非線形な関数として表現されるため、線形の最適化アルゴリズムを適用することができないという問題が存在する。そこで、変数間の関連性と隣接性を考慮し、球形特徴量を線形な関数として再定義することで、線形の最適化アルゴリズムの適用を可能にしている。

さらに、本論文では、プロキシモデル法という3次元形状の変形手法を新たに提案している。これは、最適化による変形結果の品質が、入力のメッシュ形状に依存する問題への対処法であり、凸形状かつ一様なポリゴンで表現されるプロキシモデルを作成し、その上で最適化による変形と、投影に基づく補間を行うことで、入力形状の変形を表現する手法となっている。

上記2つの提案手法を実装し、多様な入力形状やパラメータに対する変形結果を具体的に示すとともに、提案手法の適用範囲や応用性について議論している。提案手法は、従来容易に生成することが困難であった類似球形状の生成を自動化し、効率よく類似球形状の生成を可能としたことが評価できる。

本論文の構成は以下のようである。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的、および、本論文の全体構成について

述べている。

第2章では、本研究と関連の深い先行研究を整理して述べている。加えて、先行研究の技術的な手法の精査を行い、既存の最適化に基づく変形手法では、ディテールを保持したまま球形状へ変形することが困難であることを示している。

第3章では、球形状変形のエネルギー関数について述べている。本論文では、ARAPと球形特徴量の線形和で球形状変形のエネルギー関数を定義している。本章では、直感的な球形特徴量の説明、および、その直接的な関数表現について述べた後、これらの合成により、非線形エネルギー関数の定義について説明している。本章で定義されたエネルギー関数の最適化に関する計算方法と、最適化結果を示しており、数値計算の安定性に問題が生じると述べている。

第4章では、第3章で定義したエネルギー関数の線形化に関して議論しており、変数間の関連性と隣接性に着目することで、球形状特徴量が線形な関数となるように再定義する手法を説明している。そして、エネルギー関数に対して、具体的な最適化の計算方法の説明と、多様な入力形状やパラメータに対する変形結果を示している。加えて、具体的にどの部分が強く変形されるかに関する可視化を行っている。

第5章では、プロキシモデル法の具体的な計算手法を説明している。プロキシモデル法の適用結果も示しており、第4章の手法による変形結果の品質について、入力のメッシュ形状に依存する問題が改善できたことを論じている。

第6章は、結論であり、本論文をまとめるとともに、提案手法の将来性に関する見解を述べている。

以上、本論文では、既存の技術では実現が困難であった3次元形状の球形状変形手法について詳細に報告している。提案手法の新規性と実用性を適切に議論しており、本研究は、コンピュータグラフィックス分野、特に3次元形状の変形技術の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

Spherical Style Deformation on Single Component Models, Xuemei FENG, Qing FANG, Kouichi KONNO, Zhiyi ZHANG, and Katsutsugu MATSUYAMA, IEICE Transactions on Information and Systems (2023年7月26日採録決定)