

실시간 UV 품질 분석을 위한 경량 UV 자동 보정 파이프 라인 설계

강지민, 정다현, 안호연

순천향대학교, 순천향대학교, 순천향대학교*

20233618@sch.ac.kr, ekgus5714@sch.ac.kr, hoyeon@sch.ac.kr*

Lightweight UV Auto Calibration Pipeline Design for Real-Time UV Quality Analysis

Jimin Kang, Dahyun Jung, Ho-Yeon Ahn*

Shunchunhyang Univ., Shunchunhyang Univ., Shunchunhyang Univ.*

요약

본 논문은 3D 메시의 UV 좌표 품질을 자동으로 분석하고, 수정 과정의 효과를 직관적으로 시각화하는 휴리스틱 기반 경량 분석 파이프라인을 제안한다. 본 연구에서는 3D 정점 분산 대비 UV 분산 비율을 기반으로 한 stretch 지표와 인접 UV 평균 간격 기반 density 지표를 사용하여 UV 상태를 정량화하고, 겹침(overlap)과 전역 뒤집힘(flipped)을 탐지한다. 탐지된 영역에 대해 국소적 자동 보정을 적용하고, 수정 이후 이동량을 히트맵으로 시각화한다. 실세계 메시(cottage)에 적용한 결과 overlap이 약 83% 감소하여 방법의 유효성을 확인하였다.

I. 서론

UV 매핑은 텍스처 품질에 직접적인 영향을 미치며, UV 겹침과 왜곡은 시각적 오류를 유발한다 [2]. 기존의 연구 방법은 계산 비용이 많이 들거나 면 위상 정보(face connectivity)가 필요하여 경량 분석에 제약이 있다 [1]. 본 연구는 전역 분산 통계와 UV 분포만을 이용한 간단한 지표와 시각화를 통해 UV 품질을 분석·해석 가능한 형태로 제공하는 것을 목표로 한다.

II. 본론

본 논문에서는 메시 UV 좌표에서 발생하는 대표적인 문제인 좌표 겹침(overlap)과 뒤집힘(flipped)을 자동으로 탐지하고, 최소한의 수정만을 가하는 휴리스틱 기반 UV 보정 파이프라인을 제안한다. 제안 방법은 (1) 특징 추출, (2) 문제 탐지, (3) 국소적 자동 보정, (4) 정량적 평가의 네 단계로 구성된다.

2.1 UV 특징 추출

Stretch는 정점 분산 대비 UV 분산 비율로 정의되며 전역 왜곡 정도를 나타낸다(식 1). Density는 인접 UV 좌표 간 평균 거리로 정의되어 과밀 또는 희소 영역을 반영한다.

$$Stretch = \frac{\|std(V)\|}{\|std(U)\|} \quad (1)$$

이 두 지표는 이후 보정 전후 변화량을 비교하기 위한 기준으로 활용된다.

2.2 UV 문제 탐지

본 연구에서는 UV 좌표에서 빈번하게 발생하는 품질 저하 요인을 겹침(overlap)과 뒤집힘(flipped)의 두 가지 대표적인 문제로 정의하고, 메시의 면(face) 정보나 복잡한 기하 연산 없이도 적용 가능한 휴리스틱 기반 탐지 방법을 사용한다.

(1) Overlap 탐지

UV 겹침은 서로 다른 UV 좌표 쌍 간 유클리디안 거리가 임계값 ε 이하인 경우로 정의한다. 이를 위해 UV 좌표를 ε -격자 공간으로 양자화한 뒤 동일 셀에 속한 좌표들을 overlap 후보로 간주한다. 구체적으로, 서로 다른 두 UV 좌표 u_i, u_j 에 대해 다음 조건 수식 (2)을 만족할 경우 겹침으로 판정한다.

$$\|u_i - u_j\|_2 < \varepsilon \quad (2)$$

여기서 ε 사용자 정의 임계값으로, UV 공간에서 허용 가능한 최소 분리 거리를 의미한다. 본 연구에서는 격자 양자화를 통해 후보를 효율적으로 탐지한다(식 2). 이를 통해 탐지 복잡도를 크게 줄이면서도 실질적인 겹침 영역을 효과적으로 식별할 수 있다.

(2) Flipped 탐지

본 연구에서는 전역적인 UV 방향성 반전 여부를 간단히 판별하기 위해, UV 좌표 분포의 공분산 행렬(covariance matrix)을 이용한 휴리스틱을 적용한다. 전체 UV 좌표 집합 U 에 대해 공분산 행렬 Σ_U 를 계산한 뒤, 그 행렬식(determinant)을 분석한다.

$$\det(\Sigma_U) < 0 \quad (3)$$

위의 수식 (3) 조건일 경우, UV 공간이 전역적으로 뒤집힌 상태로 판단한다. 이 방법은 국소적인 flipped(face 단위 반전)는 탐지하지 못하지만, 전체 UV 방향성이 반전된 경우를 매우 낮은 계산 비용으로 신속하게 판별할 수 있는 전략이다.

2.3 국소적 자동 보정

Flipped 보정은 UV 좌표의 v 성분에 대해 $v \leftarrow 1 - v$ 연산을 적용하여 0 - 1 범위 내에서 안전하게 반전한다.

Overlap 보정은 overlap으로 판별된 좌표에 대해서만 평균 0, 표준편차 σ 의 가우시안 노이즈를 추가하여 좌표를 미세 이동시킨다.

III. 실험 및 결과

3.1 실험 설계

실험은 단일 실세계 3D 메시(cottage 모델)를 대상으로 수행하였다. 입력 메시로부터 정점 좌표와 UV 좌표를 추출한 후, 제안 방법을 적용하였다. overlap 판정 임계값은 $\epsilon = 10^{-3}$, 보정 노이즈 스케일은 $\sigma = 10^{-3}$ 으로 설정하였다. 모든 실험은 동일한 환경에서 반복 수행되었으며, 랜덤 요소는 고정된 시드값을 사용하여 재현이 가능하다.

3.2 정량적 평가 및 결과 분석

본 절에서는 제안한 UV 보정 파이프라인의 효과를 정량적으로 분석하기 위해, 표 1에 정의된 UV 품질 평가 지표를 기준으로 보정 전후 결과를 비교하였다. 평가는 UV 겹침 감소 여부, 보정의 보수성, 그리고 전역적 왜곡 변화의 세 가지 관점에서 수행되었다.

구분	지표명	정의	목적
UV 겹침	Overlap Ratio	겹침 UV 비율	겹침 문제 감소 여부
UV 겹침	Overlap Count	겹침 UV 개수	문제 규모 정량화
보정 보수성	Mean UV Displacement	평균 이동량	구조 유지 여부
보정 보수성	Max UV Displacement	최대 이동량	이상치 확인
보정 보수성	95% Displacement	상위 5% 이동량	국소 수정 정도
왜곡	Stretch Change	stretch 변화량	왜곡 악화 여부
시각화	Change Heatmap	이동량 색상 시각화	보정 위치 확인

표1. UV-native 평가 지표

그림 1은 보정 전후 UV 좌표 분포의 공간적 변화를 3차원적으로 시각화한 결과이다. 보정 전에는 다수의 UV 좌표가 동일하거나 매우 인접한 위치에 중첩되어 밀집된 클러스터를 형성하고 있지만, 보정 후에는 해당 중첩 영역이 완화되며 좌표들이 국소적으로 분산된 모습을 확인할 수 있다. 이러한 변화는 전체 UV 구조를 유지한 상태에서 문제 영역에 한정된 미세 조정이 이루어졌음을 보여준다.

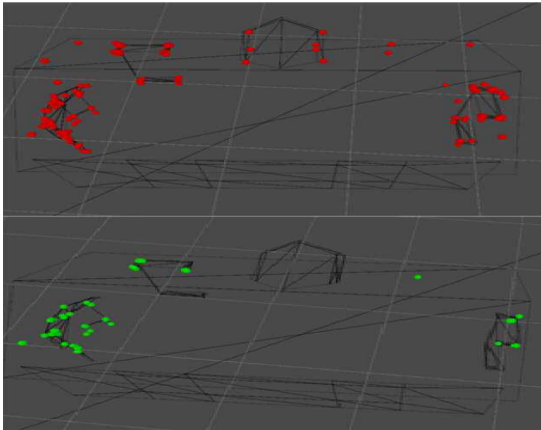


그림 1 UV 중복 보정 전후의 3차원 좌표 분포 비교. 상단은 보정 전, 하단은 보정 후 결과

IV. 결론

본 논문에서는 3D 메시의 UV 좌표에서 발생하는 대표적인 품질 문제

인 좌표 겹침과 전역 뒤집힘을 자동으로 분석하고, 국소적인 보정을 통해 이를 완화하는 경량 UV 분석 및 보정 파이프라인을 제안하였다. 제안 방법은 복잡한 기하 연산이나 학습 기반 모델을 사용하지 않고도, UV 좌표 자체의 통계적 특성과 공간적 분포를 이용하여 문제 영역을 효과적으로 식별하고 해석 가능하게 시각화하는 것을 목표로 한다.

지표명	보정 전	보정 후	변화량
Overlap Ratio	0.650370	0.109630	0.540741
Overlap Count	439	74	365
Mean UV Displacement	0.000800	--	--
Max UV Displacement	0.003532	--	--
95% Displacement	0.002296	--	--
Stretch Change	32.695000	32.693161	0.001839
Change Heatmap	0.002838	0.002728	0.000110

표2. 테스트 후 결과값

실험 결과, overlap으로 판별된 UV 좌표는 총 439개에서 74개로 감소하여 겹침 문제가 상당 부분 완화됨을 확인하였다. 동시에 평균 UV 이동 거리는 0.0008, 최대 이동 거리는 0.0035 수준으로 유지되어, 보정이 전체 UV 구조를 크게 변경하지 않고 국소적으로만 이루어졌음을 보여준다.

시각화 결과를 통해 보정이 overlap 영역에 한정되어 적용되었으며, UV 분포의 전반적인 구조는 유지됨을 직관적으로 확인할 수 있었다. 이는 본 파이프라인이 문제 탐지 - 보정 - 결과 해석을 하나의 일관된 흐름으로 제공하여 UV 품질 디버깅 과정을 효과적으로 지원함을 의미한다.

본 접근은 계산 비용이 적고 구현이 간단하여, 고정밀 최적화 기법을 대체하기보다는 UV 품질 진단 및 경량 보정 도구로서 교육적 환경 등에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 먼 기반 왜곡 지표 및 island 단위 분석을 통합하여 보다 복잡한 UV 오류로의 확장을 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Global - Learning & Academic research institution for Master's-PhD students, and Postdocs(G-LAMP) Program of the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Ministry of Education(No. RS-2025-25441283)

참 고 문 헌

[1] Yue Chen, "UV Volumes for Real-time Rendering of Editable Free-view Human Performance", CVPR, 2023
[2] Qijian Zhang, "Flatten Anything: Unsupervised Neural Surface Parameterization", NeurIPS, 2024