

VR 기반 가상훈련 시스템의 몰입도 향상을 위한 렌더링 최적화 전략 연구

김기남, 이상화, 김성채, 정예원, 이승욱*

(주)윈텍, *LIG넥스원

knkim@win-tek.co.kr, shleea@win-tek.co.kr, sckim@win-tek.co.kr, ywjung@win-tek.co.kr,
*seungwook.lee2@lignex1.com

A Study on Rendering Optimization Strategies for Enhancing Immersion in VR-Based Virtual Training Systems

Kim Ki Nam, Lee Shang Hwa, Kim Sung Chae, Jung Ye Won, Lee Seung Wook*

WINTEK, *LIG Nex1

요약

본 논문은 VR 기반 가상훈련 시스템에서 발생하는 렌더링 병목 문제 중 하나인 드로우콜 과다 현상을 해결하고자 Unity의 기존 렌더링 구조와 개선된 구조를 비교 분석하였다. 기존 방식은 렌더링 최적화에 한계가 있어 실시간성과 몰입감 유지에 어려움이 있었던 반면, 개선된 구조는 렌더링 흐름을 유연하게 제어하고 자원 활용을 효율화함으로써 성능을 크게 향상시켰다. 실험 결과, 개선된 구조가 프레임율 안정성과 처리 속도 측면에서 VR환경에 더 적합함을 확인하였다.

I. 서론

가상현실(VR)을 기반으로 하는 가상훈련 시스템은 실제 환경을 시뮬레이션하며, 몰입도와 반복 가능성, 안전성 측면에서 기존 교육 방식 대비 강점을 지닌다. 하지만 이러한 시스템은 높은 프레임율 안정성과 낮은 지연시간이 필수적이며, 이는 GPU·CPU의 렌더링 성능에 크게 의존한다. VR 콘텐츠는 특히 복잡한 3D 오브젝트 처리와 양안 렌더링 구조로 인해 렌더링 병목 현상이 자주 발생한다. 특히, 드로우콜의 과도한 발생은 몰입도 저하의 주요 원인 중 하나로 지목된다.

본 연구는 VR 기반 훈련 시스템에서 드로우콜 병목의 문제를 해결하기 위해, Unity의 렌더링 구조를 비교 분석하고, SRP 기반 최적화 전략의 효과를 실험적으로 입증하고자 한다.

II. 본론

본 장에서는 VR 환경의 렌더링 특성과 드로우콜 병목 현상의 원인을 설명하고, Unity의 BRP와 SRP 렌더링 파이프라인 구조를 비교 분석한 후, 실제 실험을 통해 두 구조의 성능 차이를 검증한다.

1) VR 환경에서의 렌더링 특성과 드로우콜 병목

VR 콘텐츠는 몰입도 높은 체험을 위해 일반 콘텐츠보다 훨씬 높은 렌더링 성능이 요구된다. 양안 렌더링 방식으로 인해 GPU의 부하는 일반 콘텐츠의 두 배에 달하며, 사용자의 어지러움과 이질감을 방지하기 위해 90fps 이상의 프레임 속도, 낮은 지연시간(latency), 안정적인 GPU 처리 시간이 필수적이다.

드로우콜(draw call)은 CPU가 GPU에 메시(mesh), 머티리얼(material), 셰이더(shader) 등의 렌더링 명령을 전달하는 과정 중 하나이다. 다양한 오브젝트가 서로 다른 머티리얼과 셰이더를 사용할 경우, 각각 별도의

드로우콜로 처리되며, 이 과정에서 드로우콜 수가 급격히 증가한다.

드로우콜이 많아지면 CPU가 GPU에 명령을 전달하는 데 걸리는 시간이 증가하며, CPU와 GPU 간의 통신 병목은 프레임 드랍, 렌더링 지연, 몰입도 저하 등 성능 저하로 직결된다. 따라서 실시간성이 요구되는 VR 환경에서는 렌더링 최적화를 위해 CPU와 GPU간의 통신 병목 해소가 중요하다. [1][2]

2) Unity 렌더링 파이프라인 구조 분석

Unity는 기본적으로 Built-in Rendering Pipeline(BRP)을 제공해 왔으나, 고성능 렌더링과 다양한 콘텐츠 유형에 맞는 유연성을 확보하기 위해 Scriptable Rendering Pipeline(SRP)을 도입하였다. SRP 구조는 개발자가 렌더링 순서와 구성 방식을 직접 정의할 수 있는 구조로, 특히 GPU 자원 활용 최적화 및 다양한 렌더링 조건 제어에 유리하다.

기존의 BRP 구조는 렌더링 과정을 자동으로 처리하지만, VR 환경과 같은 복잡하고 대규모 씬에서 병목 현상을 유발할 수 있는 여러 구조적 한계를 지닌다. 다음은 BRP 구조의 주요 특징과 한계를 정리한 표이다. [3][4]

항목	BRP 구조 특징 및 한계
렌더링 흐름 제어	고정된 렌더링 파이프라인, 사용자 제어 불가
배치 방식	드로우콜 처리량 최적화는 가능하나, CPU-GPU 송수신 최적화는 불가능
셰이더 처리	다양한 머티리얼·셰이더 사용 시 드로우콜 분산으로 처리 비용 증가
렌더링 데이터 관리	매 드로우콜마다 렌더링 데이터 업로드 필요
VR 실시간 대응	CPU-GPU 송수신 최적화 방안의 부재로 인한 프레임 드랍 방어 구조 부족

표 1 BRP 구조의 특징 및 한계

VR 콘텐츠는 양안 렌더링으로 인한 GPU 부하, 낮은 지연시간 유지, 실시간 렌더링 프레임 안정성 등 고성능 요건이 존재한다. SRP 구조는 이러한 요구사항을 충족하기 위해 설계된 구조이며, BRP 구조의 한계점을 보완하는 방식으로 VR 환경에 더 적합하다. 다음은 BRP 구조와 SRP 구조의 특징을 비교한 표이다. [3][4]

항목	BRP 구조 특징	SRP 구조 특징
렌더링 흐름 제어	제어 불가	제어 가능
배치 방식	드로우콜 처리량 최적화	드로우콜 처리량 및 GPU 전달방식 최적화
셰이더 처리	드로우콜 개별 셰이더 처리	드로우콜 통합 셰이더 처리
렌더링 데이터 관리	매 드로우콜마다 렌더링 데이터 업로드 필요	최초 렌더링 데이터 설정 후 변경된 데이터만 업로드
VR 실시간 대응	프레임 속도 유지 불안정	프레임 속도 안정적 유지

표 2 BRP 구조와 SRP 구조의 특징 비교

3) 실험 및 결과

동일한 환경 조건에서 BRP 구조와 SRP 구조의 렌더링 성능을 비교하는 실험을 수행하였다. 실험 설계 및 결과는 다음과 같다.

3.1) 실험 설정

본 실험은 동일한 VR 훈련 환경에서 두 가지의 렌더링 구조를 적용하여 성능 변화를 비교하였다.

항목	설명	적용 기법
BRP(Built-in RP) 구조	Unity 기본 렌더링 파이프라인 적용	- 정적 배치 - 유니티 기본 셰이더
SRP(URP/HDRP) 구조	URP를 적용하여 렌더링 흐름을 직접 제어하여 적용	- SRP Batcher - 셰이더 통합 처리

표 3 실험 설정

3.2) 실험 측정 항목

실험에서는 다음과 같은 항목을 측정하여 BRP 구조 대비 SRP 구조의 렌더링 성능 향상 여부를 분석하였다.

항목	설명	목표
드로우콜 수	드로우콜 생성량 측정	드로우콜 생성량 감소 여부 확인
프레임 속도	평균 프레임 속도 측정	평균 프레임 속도 향상 여부 확인
GPU 처리 시간	그래픽 화면 렌더링 수행 소요 시간 측정	GPU 처리 시간 단축 여부 확인
CPU 처리 시간	렌더링 외의 연산 처리 소요 시간 측정	CPU 처리 시간 단축 여부 확인
시각적 품질	시각적 품질 육안 확인	시각적 품질 유지 여부 확인

표 4 실험 측정 항목

3.3) 실험 결과

SRP 구조로 렌더링을 수행했을 경우, BRP 구조 대비 드로우콜 수가 약 46%가 감소하였으며, 프레임 속도는 약 18%가 향상되었고, GPU 및 CPU 처리 시간은 각각 56.8%, 38.4%가 단축되었다. 이를 통해 SRP 기반 렌더링 최적화 구조가 VR 환경에서 시각적 품질은 유지하고 실시간성 및 물 입도 확보에 효과적임을 입증하였다.



실험 항목	BRP 구조 적용	SRP 구조 적용
드로우콜 수	6,774 개	3,656 개
프레임 속도	85.3 fps	104 fps
GPU 처리 시간	8.28 ms	3.57 ms
CPU 처리 시간	15.79 ms	9.72 ms
시각적 품질		

표 5 실험 결과

III. 결론

본 연구는 VR 기반 가상훈련 시스템에서의 렌더링 성능 병목의 원인으로 드로우콜을 지목하고, Unity의 렌더링 구조 중 SRP 구조가 BRP 구조의 한계를 어떻게 구조적으로 보완하는지를 분석하였다. 실험 결과를 통해 SRP 구조는 드로우콜 수 감소, 프레임 속도 향상, 연산 효율성 측면에서 VR 환경에 적합한 구조임을 입증하였다.

본 연구 결과를 바탕으로, 향후 연구에서는 다양한 씬 유형에서의 최적화 방식, 렌더링 외 LOD 및 AI 기반 동적 최적화 기법에 대한 확장 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 산업통상자원부 2023년 민·군기술이전사업 연구과제 [VR기반의 유도탄 및 수중탄 과학화 정비교육체계 구현]로 수행되었음. (No. 23-SN-CV-05)

참 고 문 헌

[1] Oculus. (2022). Oculus Developer Guide. Meta Platforms Inc.

[2] Seong-Jin Han, Min-Jin Kim, Jung-Yi Kim. (2024). Research on 3D Content Optimization Methods in VR Devices. The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), 10(6), 641-647.

[3] Unity Technologies. (2023). Unity Manual: Scriptable Rendering Pipeline. <https://docs.unity3d.com/>

[4] Khodyka OS Building a scriptable render pipeline in unity engine / OS Khodyka ; Supervisor Can. of Tech. Sciences., Sen. Res. Fellow VM Reshetnik // Radioelectronics and youth in the XXI century: materials of the 28th International Youth Forum, April 16 - 18, 2024 - Kharkiv: KhNURE, 2024.