

A Cutting-Plane-Centered Volume Rendering Exploration Interface Using Breath-Based Simultaneous Interaction

Jong-Hyun Kim*

*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology),
Graduate School of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon, Korea

[Abstract]

Traditional cutting-plane exploration in volume rendering relies on sequential keyboard–mouse input, limiting simultaneous translation and rotation and reducing interaction intuitiveness. We propose a breath-based multi-input technique that separates hand and breath inputs, enabling synchronized control of cutting-plane rotation and translation. Breath signals, captured via a microphone, drive continuous plane translation for seamless cross-section exploration. Implemented in an Unreal Engine-based volume rendering system, the method improves exploration efficiency and interaction naturalness. This approach provides a practical interface for intuitive visualization of complex volumetric data in fields such as medical imaging and scientific simulation.

▶ **Key words:** Volume rendering, Cutting plane interface, Breath interface, Multimodal interaction, Scientific visualization

[요 약]

전통적인 볼륨 렌더링에서의 절단면 탐색은 순차적인 키보드-마우스 입력에 의존하여, 평면의 이동과 회전을 동시에 수행하기 어렵고 직관적인 상호작용을 제한한다. 본 연구에서는 손 입력과 호흡 입력을 분리하여 절단면의 회전과 이동을 동시에 제어할 수 있는 호흡 기반 다중 입력 기법을 제안한다. 마이크로폰을 통해 수집된 호흡 신호는 연속적인 평면 이동을 구동하여, 단면 탐색을 보다 자연스럽게 수행할 수 있도록 한다. 제안 기법은 언리얼 엔진 기반의 볼륨 렌더링 시스템에 구현되었으며, 복잡한 볼륨 구조에서 탐색 효율성과 상호작용의 자연스러움을 향상시킨다. 본 접근법은 의료 영상 및 과학 시뮬레이션과 같은 분야에서 복잡한 볼륨 데이터의 직관적인 시각화를 위한 실용적인 인터페이스를 제공한다.

▶ **주제어:** 볼륨 렌더링, 절단면 인터페이스, 입바람 인터페이스, 다중 입력 상호작용, 과학 시각화

-
- First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
 - *Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering, Inha University
 - Received: 2026. 01. 19, Revised: 2026. 03. 13, Accepted: 2026. 03. 23.

I. Introduction

볼륨 렌더링(volume rendering)은 3차원 스칼라 데이터를 직접 시각화하는 대표적인 기법으로, 의료 영상, 과학 시뮬레이션, 산업 분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 CT, MRI와 같은 의료 영상에서는 절단면(cutting plane)을 이용한 단면 탐색이 필수적인 도구로 사용되며, 사용자는 절단면의 위치와 방향을 조절함으로써 볼륨 내부 구조를 분석한다. 이러한 절단면 기반 탐색은 데이터의 내부를 직관적으로 이해할 수 있다는 장점이 있으나, 인터페이스 설계에 따라 탐색 효율과 사용자 경험이 크게 달라진다.

기존의 볼륨 렌더링 뷰어는 주로 키보드와 마우스를 중심으로 한 단일 입력 채널에 의존하여 절단면을 제어한다. 이들 인터페이스는 절단면의 이동과 회전을 서로 분리된 동작으로 설계하는 경우가 많아, 사용자가 두 동작을 동시에 수행하기 어렵다. 그 결과, 사용자는 절단면을 이동한 뒤 조작을 멈추고 회전을 수행하거나, 다시 이동하는 과정을 반복해야 한다. 이러한 순차적 조작 방식은 볼륨 내부 구조의 연속적인 변화를 끊임 없이 관찰하는 데 제약을 주며, 특히 복잡한 내부 형상을 가진 데이터에서는 공간적 이해를 어렵게 만든다.

이러한 문제는 단순한 조작 편의성의 문제가 아니라, 볼륨 탐색 과정에서의 인지적 부하 증가와 직결된다. 절단면의 이동과 회전이 분리된 상태로 수행될 경우, 사용자는 현재 보고 있는 단면과 이전 단면 사이의 관계를 지속적으로 기억하고 재구성해야 한다. 이는 내부 구조의 형태 변화나 공간적 연속성을 직관적으로 파악하는 데 불리하게 작용하며, 볼륨 데이터 탐색의 효율을 저하시킨다. 따라서 절단면의 위치 변화와 방향 변화를 동시에 제어할 수 있는 새로운 인터페이스 설계가 요구된다.

본 연구는 이러한 기존 인터페이스의 구조적 한계를 개선하기 위해, 입바람(breath)을 활용한 다중 입력 상호작용 기반 볼륨 렌더링 인터페이스를 제안한다. 제안 방식은 손 기반 입력과 입바람 기반 연속 입력을 서로 다른 입력 채널로 분리하여, 절단면의 회전과 이동을 동기화된 형태로 동시에 제어할 수 있도록 설계되었다. 입바람은 마이크 입력을 통해 연속적인 스칼라 값으로 해석되며, 절단면의 위치 변화를 실시간으로 제어하는 데 사용된다. 이를 통해 사용자는 오브젝트를 회전시키는 과정에서도 절단면을 연속적으로 이동시키며, 볼륨 내부 구조의 변화를 자연스럽게 탐색할 수 있다.

본 논문의 기여는 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째,

절단면 기반 볼륨 탐색 인터페이스에서 이동과 회전이 분리되어 있는 기존 방식의 한계를 명확히 분석하고, 동시 상호작용의 필요성을 제시한다. 둘째, 입바람을 연속 입력 장치로 활용한 다중 입력 인터페이스를 설계하여, 절단면의 위치와 방향을 동시에 제어할 수 있는 새로운 탐색 방식을 제안한다. 셋째, 언리얼 엔진 기반 다이렉트 볼륨 렌더링 환경에서 제안 기법을 구현하고 사례 연구를 통해 복잡한 볼륨 내부 구조 탐색에서의 효율성과 조작 자연성 향상을 확인한다. 본 연구는 향후 의료 영상 및 과학 시각화 분야에서 동시 상호작용 기반 볼륨 탐색 인터페이스 설계에 유의미한 시사점을 제공한다.

최근 의료 영상(CT, MRI), 과학 시뮬레이션, 산업용 비파괴 검사 등 다양한 분야에서 고해상도 볼륨 데이터의 활용이 급격히 증가하고 있다. 이러한 데이터는 내부 구조를 정밀하게 분석할 수 있는 장점을 가지지만, 그 복잡성과 데이터 규모로 인해 사용자가 관심 영역을 효율적으로 탐색하는 것이 중요한 과제로 대두되고 있다.

특히 의료 영상 분석의 경우, 병변의 위치와 형태를 정확하게 파악하기 위해서는 볼륨 내부 구조를 연속적으로 탐색하는 과정이 필수적이며, 탐색 인터페이스의 효율성과 직관성은 실제 진단 과정의 정확도와 직결될 수 있다. 또한 산업 현장에서는 복잡한 내부 결함을 빠르게 탐지해야 하는 요구가 증가함에 따라, 사용자 중심의 인터랙티브 시각화 기술에 대한 필요성이 더욱 강조되고 있다.

그러나 기존의 절단면 기반 볼륨 렌더링 인터페이스는 이동과 회전을 순차적으로 수행하는 구조적 한계를 가지며, 이는 탐색 과정의 단절과 인지적 부담 증가로 이어질 수 있다. 이러한 문제는 단순한 조작 편의성의 문제가 아니라, 실제 분석 작업의 효율성과 정확성에 영향을 미치는 중요한 요소이다.

따라서 본 연구는 이러한 사회적·응용적 요구를 반영하여, 절단면의 이동과 회전을 동시에 제어할 수 있는 동시 상호작용 기반 인터페이스를 제안하고, 보다 직관적이고 연속적인 볼륨 탐색 환경을 제공하고자 한다.

II. Related Work & Problem Statement

본 연구는 기존 학술대회 논문에서 제시한 입바람 기반 볼륨 렌더링 상호작용을 KCI 정규 논문 수준으로 확장하기 위해, (1) 볼륨 렌더링 탐색 인터페이스(특히 절단면/클리핑 조작)와 (2) 다중 입력(multimodal) 및 호흡(breath) 기반 상호작용의 두 축에서 선행연구를 정리한다.

1. Volume Rendering Exploration Interfaces and Clipping Plane Manipulation

볼륨 렌더링의 핵심은 내부 구조를 직접 가시화하는 것으로, 고전 연구들은 표면 추출 없이도 볼륨을 직접 투영·합성하는 접근을 정립했다. 대표적으로 Levoy의 샘플 기반 표면 표시(1988)[1], Drebin-Carpenter-Hanrahan의 볼륨 렌더링(1988)[2], Max의 광학 모델 정리(1995)[3], Kaufman-Mueller의 개요 정리(2005)는 오늘날 DVR(Direct Volume Rendering) 파이프라인의 기반을 제공한다[4]. 이후 연구 관심은 “무엇을 렌더링할 것인가(transfer function, 조명)”뿐 아니라 “사용자가 어떻게 탐색할 것인가(인터랙션)”로 확장되었고, Bailey는 DVR 상호작용 관점에서 절단면·등가면·전달함수 등의 조작을 개념적으로 정리했다[5]. 또한 Kniss 등은 다차원 전달함수를 상호작용적으로 설계·갱신하는 기법을 제시해, 탐색 과정의 ‘조작 가능성’을 강화했다[6]. Pfister 등은 전달함수 설계/평가의 실무적 관점을 ‘bake-off’ 형식으로 정리하며, 실제 사용 맥락에서의 조작 이슈를 부각했다[7].

절단면 기반 탐색은 여전히 핵심 도구이며, 절단면을 더 직접적·자유롭게 조작하려는 시도들이 존재한다. Clifton-Turk는 “cutting planes and beyond”에서 손/도구 기반의 직접 조작을 통해 다양한 형태의 절단(평면·선형·곡면 등)을 탐색하는 방향을 제시했다[8]. Qi-Martens는 볼륨 데이터에서 3D 클리핑 평면을 tangible UI로 제어하는 사례 연구를 제시하며(ICMI 2005), 절단면 조작을 물리적 조작 메타포로 확장했다[9]. 한편, 절단면 자체가 아니라 볼륨을 “갈라서” 내부를 보는 bimanual 기법인 Volume Cracker는 사용자가 두 손으로 볼륨을 책처럼 벌려 내부 구조를 분석하게 하여(ACM SUI 2013), 절단면 중심 인터페이스를 넘어서는 대안적 탐색 메타포를 제시했다[10]. 이후 Bare-hand 버전은 손 추적 기반의 자유공간(bare-hand) 상호작용으로 확장되었다[11].

정리하면, 기존 연구들은 절단면/볼륨 탐색을 다양한 장치(도구·양손·VR 컨트롤러 등)로 확장해왔지만, 많은 시스템이 여전히 동일 입력 채널/모드 전환에 기대어 “회전 vs. 이동”을 순차적으로 수행하게 만드는 경향이 있다. 본 연구는 이 지점에서 입바람(연속 스칼라)과 손(공간 조작)을 채널 분리해 “동시 제어”를 목표로 한다.

2. Multimodal Interaction and Breath-Based Interaction

멀티모달 상호작용은 음성·제스처·터치 등 서로 다른 입력 채널을 결합해 의도를 명확히 하고 인지 부담을 줄이려

는 흐름이다. Lucente 등은 대형 디스플레이에서 음성 인식과 비전 기반 제스처를 결합한 “deviceless multimodal” 테스트베드를 제시해, 시각화 맥락에서 멀티채널 상호작용 가능성을 보여주었다[12]. 제스처 기반 3D 조작·내비게이션 연구 또한 다수 축적되어 왔으며, 예를 들어 O’Hagan 등은 비전 기반 제스처로 가상환경 내 3D 조작을 다루었다[13].

본 논문과 직접적으로 맞닿는 축은 호흡(breath) 기반 입력을 ‘연속 제어 신호’로 사용하는 연구이다. Hundia 등은 마이크 기반으로 강한 날숨 패턴을 감지해 상호작용 이벤트로 연결하는 접근을 제시했고[14], Kim 등은 모바일 디바이스 센서와 호흡 입력을 결합해 VR/게임/애니메이션에서 실시간 제어 프레임워크를 제안하여 “입바람을 조작 채널로 쓸 수 있다”는 근거를 제공한다[15]. 이러한 선행연구들은 호흡 입력이 손이 바쁜 상황에서의 보조 채널이거나 접근성(accessibility) 향상에 유리함을 시사한다.

최근 연구에서는 기존의 단일 입력 기반 인터페이스를 넘어, 다양한 입력 채널을 결합하는 멀티모달 상호작용(multimodal interaction)이 중요한 연구 방향으로 부각되고 있다. Oviatt는 멀티모달 인터페이스가 사용자 인지 부담을 감소시키고 보다 자연스러운 상호작용을 가능하게 한다는 점을 제시하였다 [16]. 또한 Turk는 인간 중심 인터페이스 설계에서 멀티모달 입력이 직관적인 정보 전달과 상호작용 효율 향상에 기여함을 강조하였다 [17].

한편, 과학 시각화 및 볼륨 렌더링 분야에서도 사용자 인터페이스의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다. Keefe는 과학 시각화 환경에서 사용자 상호작용이 데이터 이해 과정에 중요한 역할을 한다고 보고하였으며 [18], Yu 등은 대규모 볼륨 데이터 시각화에서 상호작용 기법이 탐색 효율과 표현력 향상에 핵심적인 요소임을 정리하였다 [19].

이러한 연구 흐름은 단일 입력 기반의 순차적 인터페이스를 넘어, 서로 다른 입력 채널을 결합한 동시 상호작용 방식의 필요성을 뒷받침하며, 본 연구는 입바람 기반 연속 입력을 활용하여 이러한 멀티모달 상호작용을 확장하고자 한다.

3. Conventional Interface Limitation

기존 볼륨 렌더링 시스템에서 절단면(cutting plane)을 이용한 탐색은 내부 구조를 분석하는 핵심 수단으로 활용되어 왔다. 그러나 다수의 상용 및 연구용 볼륨 렌더링 인터페이스는 절단면의 이동(translation)과 회전(rotation)을 동일한 입력 장치 또는 동일한 조작 모드에 할당하는 구조를 갖는다. 이로 인해 사용자는 두 동작을 동시에 수

행하기 어렵고, 순차적인 조작 과정을 반복하게 된다 (Fig. 1 참조).

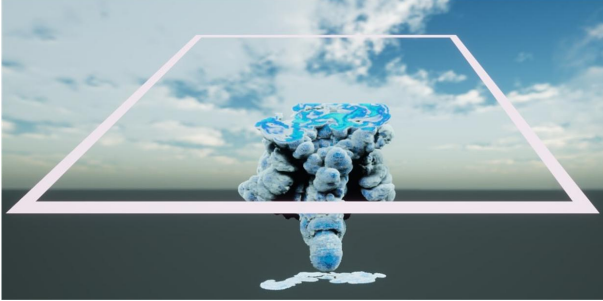


Fig. 1. Cross-sectional visualization using a clipping plane in a conventional volume rendering interface.

일반적인 인터페이스 구조를 도식적으로 정리하면 다음과 같다. 사용자는 먼저 입력 모드를 선택한 뒤 절단면의 위치를 이동시키고, 조작을 중단한 후 다시 회전 모드로 전환하여 방향을 변경한다. 이후 내부 구조를 확인하기 위해 다시 이동 조작을 수행하는 과정을 반복한다. 이러한 방식은 절단면 조작이 이산적인 단계(discrete steps)로 분절되도록 만들며, 볼륨 내부 구조의 변화가 연속적으로 인지되기 어렵다.

이와 같은 순차적 인터페이스는 특히 복잡한 볼륨 데이터에서 문제를 야기한다. 절단면의 위치와 방향이 동시에 변화할 때 나타나는 내부 구조의 연속적인 변형을 관찰할 수 없기 때문에, 사용자는 현재 단면과 이전 단면 사이의 공간적 관계를 기억에 의존해 추론해야 한다. 이는 인지적 부담을 증가시키고, 볼륨 탐색 과정의 효율성을 저하시킨다. 또한 단일 입력 채널에 의존하는 구조에서는 조작 속도와 정밀도 사이의 균형을 맞추기 어렵고, 탐색 과정에서의 자연스러운 흐름이 쉽게 끊어진다.

요약하면, 기존 절단면 기반 볼륨 렌더링 인터페이스의 한계는 단순히 입력 장치의 문제라기보다, 이동과 회전을 분리된 조작으로 가정한 인터페이스 설계 구조에 기인한다. 이러한 구조는 볼륨 내부 구조의 연속적 탐색을 제한하며, 보다 직관적이고 동시적인 상호작용 방식을 요구한다.

본 논문의 주요 기여는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 기존 절단면 기반 볼륨 렌더링 인터페이스에서 이동과 회전 조작이 순차적으로 분리되어 있는 구조적 한계를 분석하고, 동시 상호작용의 필요성을 명확히 제시한다.
- 손 기반 입력과 입바람 기반 연속 입력을 분리된 입력 채널로 활용하여, 절단면의 위치와 방향을 동시에 제어할 수 있는 다중 입력 인터페이스를 설계한다.

- 입바람을 연속적인 스칼라 입력으로 해석하여 절단면 이동 제어에 적용함으로써, 볼륨 내부 구조의 연속적 변화를 끊임 없이 탐색할 수 있는 상호작용 방식을 제안한다.
- 언리얼 엔진 기반 디렉트 볼륨 렌더링 환경에서 구현 및 사례 연구를 통해, 제안 인터페이스가 복잡한 볼륨 데이터 탐색에서 조작 자연성과 탐색 효율을 향상시킴을 확인한다.

III. Proposed Interface Design

본 절에서는 기존 절단면 기반 볼륨 렌더링 인터페이스의 한계를 개선하기 위해 제안하는 입바람-손 기반 다중 입력 인터페이스의 설계 원리를 설명한다. 제안 인터페이스의 핵심 목표는 절단면의 이동과 회전을 서로 다른 입력 채널에 분리하여, 사용자가 두 동작을 동시에 수행할 수 있도록 하는 것이다.

1. Design Rationale

기존 절단면 기반 볼륨 렌더링 인터페이스에서는 절단면의 위치 변화(translation)와 방향 변화(rotation)가 동일한 입력 장치에 할당되어 순차적으로 수행된다. 본 연구에서는 이러한 구조적 제약을 해결하기 위해, 공간 조작에 적합한 손 기반 입력과 연속적인 변화 제어에 적합한 입바람 기반 입력을 서로 독립적인 입력 채널로 분리한다.

이를 수식적으로 표현하면, 절단면 상태 P 는 다음과 같이 정의된다 (수식 1 참조).

$$P(t) = \{n(t), d(t)\} \quad (1)$$

여기서 $n(t)$ 는 절단면의 법선 벡터(orientation), $d(t)$ 는 원점으로부터의 거리(position offset)이다. 기존 인터페이스에서는 n 과 d 가 동일 입력에 의해 순차적으로 갱신되는 반면, 본 연구에서는 서로 다른 입력 채널을 통해 병렬적으로 갱신되도록 설계한다.

2. Hand-Based Input for Spatial Manipulation

손 기반 입력은 키보드 및 마우스를 통해 제공되며, 절단면의 방향 변화와 사용자 시점 이동을 담당한다. 오브젝트 회전에 따라 절단면의 법선 벡터는 다음과 같이 갱신된다 (수식 2 참조).

$$n(t+1) = R(t) \cdot n(t) \quad (2)$$

여기서 $R(t) \in SO(3)$ 는 사용자의 손 입력에 의해 정의되는 회전 행렬이다. 이때 절단면의 위치 파라미터 $d(t)$ 는 변경되지 않으며, 절단면은 월드 좌표계를 기준으로 유지된다.

이와 같은 설계는 오브젝트 회전 중에도 절단면의 위치 기준이 안정적으로 유지되도록 하여, 회전과 단면 탐색이 동시에 가능하도록 한다.

3. Breath-Based Input for Continuous Plane Translation and Rotation

입바람 기반 입력은 마이크를 통해 실시간으로 수집되며, 입력 신호 $b(t)$ 는 일정 범위로 정규화된 연속 스칼라 값으로 변환된다 (수식 3 참조).

$$b(t) = \text{clamp}\left(\frac{a(t) - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, 0, 1\right) \quad (3)$$

여기서 $a(t)$ 는 원시 오디오 입력의 에너지 값이며, a_{\min} , a_{\max} 는 실험적으로 설정된 범위이다. 정규화된 입바람 값은 절단면 위치 변화에 직접 매핑된다 (수식 4 참조).

$$d(t+1) = d(t) + a \cdot b(t) \quad (4)$$

여기서 a 는 이동 속도를 조절하는 스케일 계수이다. 입바람 입력이 중단되면 $b(t) \approx 0$ 이 되어 절단면 이동도 즉시 정지한다.

이 방식은 절단면 이동을 이산적인 이벤트가 아닌 연속적인 시간 함수로 취급함으로써, 사용자가 볼륨 내부 구조의 변화를 끊임 없이 관찰할 수 있도록 한다.

절단면의 회전은 축-각 표현을 기반으로 회전 행렬 $R(u, \theta)$ 를 구성하여 적용했다. 입바람 입력 신호 $b(t)$ 는 순간 변동을 완화하기 위해 1차 저역 통과 필터를 적용하여 $\tilde{b}_t = ab_t + (1-a)\tilde{b}_{t-1}$ 형태로 안정화했다. 최종 제어 변수는 시간 간격 Δt 를 포함한 상태 갱신식으로 업데이트되며, 이를 통해 입력 노이즈에 강인한 동적 상호작용을 구현했다.

4. Synchronized Interaction Mapping

제안 인터페이스의 핵심은 손 기반 입력과 입바람 기반 입력이 동일 시간 프레임에서 독립적으로 평가된다는 점이다. 각 프레임 t 에서 절단면 상태는 다음과 같이 갱신된다 (수식 5 참조).

$$P(t+1) \begin{cases} n(t+1) = R(t)n(t) \\ d(t+1) = d(t) + ab(t) \end{cases} \quad (5)$$

이를 통해 절단면의 방향과 위치가 동시에 변화하며, 시각적 피드백은 다음과 같은 평면 방정식으로 정의된다 (수식 6 참조).

$$n(t+1) \cdot x + d(t+1) = 0 \quad (6)$$

이와 같은 동기화된 갱신 구조는 기존 인터페이스에서 발생하던 조작 중단 및 모드 전환을 제거하며, 볼륨 탐색을 하나의 연속적인 상호작용 과정으로 유지한다. 특히 복잡한 내부 구조를 가진 볼륨 데이터에서 공간적 관계에 대한 직관적 이해를 효과적으로 지원한다.

5. Algorithmic Formulation

Algorithm 1은 손 기반 공간 조작과 입바람 기반 절단면 이동을 동기화하여 처리하는 프레임 단위 갱신 절차를 설명한다. 알고리즘은 절단면의 상태를 법선 벡터 n 과 오프셋 d 로 정의하고, 렌더링이 수행되는 매 프레임마다 이 값을 갱신한다. 먼저 손 입력을 통해 회전 행렬 R 을 계산하고, 이를 절단면의 법선 벡터에 적용하여 방향을 갱신함으로써 절단면의 회전을 제어한다. 이 과정에서 절단면의 위치 오프셋은 유지되어 회전과 이동 조작이 분리된다.

동시에 마이크로부터 수집된 오디오 입력은 정규화 과정을 거쳐 연속적인 스칼라 값으로 변환되며, 이는 절단면의 위치 이동을 제어하는 데 사용된다. 사용자가 입바람의 세기를 조절함에 따라 절단면은 실시간으로 연속 이동하며, 입력이 중단될 경우에는 선택적으로 초기 위치로 부드럽게 복귀하도록 설계된다. 갱신된 절단면 파라미터는 클리핑 셰이더에 즉시 반영되어, 절단면의 회전과 이동이 동시에 적용된 결과가 렌더링된다. 이를 통해 사용자는 절단면의 방향과 위치를 끊임 없이 동시 제어하며 볼륨 내부 구조를 연속적으로 탐색할 수 있다.

Algorithm 1 Breath-Hand Synchronized Cutting Plane Update

Require: Initial plane normal \mathbf{n}_0 , initial offset d_0 , step size Δt

Require: Breath mapping parameters a_{\min} , a_{\max} , speed scale α , optional return rate λ

```

1:  $\mathbf{n} \leftarrow \mathbf{n}_0$ ,  $d \leftarrow d_0$ 
2: while rendering (each frame) do ▷ (A) Hand input: orientation update
3:   Read hand input and compute rotation  $\mathbf{R} \in SO(3)$ 
4:    $\mathbf{n} \leftarrow \text{normalize}(\mathbf{R}\mathbf{n})$  ▷ (B) Breath input: continuous translation update
5:   Capture raw audio energy  $a$  from microphone
6:    $b \leftarrow \text{clamp}\left(\frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}, 0, 1\right)$ 
7:    $d \leftarrow d + \alpha b \Delta t$  ▷ (C) Optional: smooth return when breath stops
8:   if  $b < \epsilon$  then
9:      $d \leftarrow (1 - \lambda)d + \lambda d_0$ 
10:  end if ▷ (D) Apply updated plane to clipping shader
11:  Update clipping plane  $\mathcal{P} = \{\mathbf{n}, d\}$  using  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d = 0$ 
12:  Render volume with clipping plane  $\mathcal{P}$ 
13: end while

```

IV. Implementation Details

본 절에서는 제안한 입바람-손 기반 동기화 인터페이스의 구현 환경과 주요 파라미터 설정을 설명한다. 알고리즘적 설계는 앞서 제시한 Algorithm 1에 기반하며, 본 절에서는 해당 알고리즘을 실제 시스템에 적용하기 위한 구현 세부 사항을 다룬다.

1. System Environment

제안 인터페이스는 언리얼 엔진(Unreal Engine) 5.3 환경에서 구현되었으며, 디렉트 볼륨 렌더링은 엔진의 볼륨 텍스처 및 커스텀 머티리얼 셰이더를 활용하여 수행되었다. 절단면 기반 클리핑은 셰이더 단계에서 평면 방정식을 이용해 구현되며, 매 프레임 갱신되는 절단면 파라미터가 즉시 렌더링 결과에 반영된다. 입력 처리는 엔진의 기본 입력 시스템과 오디오 캡처 컴포넌트를 통해 이루어진다.

2. Breath Signal Acquisition and Preprocessing

입바람 입력은 일반적인 헤드셋 마이크를 통해 수집되며, 별도의 특수 장비 없이도 안정적인 동작이 가능하도록 설계되었다. 마이크로로부터 입력된 원시 오디오 신호는 프레임 단위로 에너지 값을 계산한 후, 실험적으로 설정된 최소값 a_{\min} 과 최대값 a_{\max} 를 기준으로 정규화된다. 정규화된 값은 $[0,1]$ 범위의 연속 스칼라 값으로 변환되며, 이는 Algorithm 1에서 정의한 입바람 입력 $b(t)$ 에 해당한다.

짧은 환경 소음이나 발화 음성의 영향을 최소화하기 위해, 오디오 에너지 값은 간단한 임계값 기반 필터링을 적용하였으며, 미세한 입력 변동에 의한 불필요한 절단면 이동을 방지하였다. 이러한 전처리 과정은 실시간 상호작용에 영향을 주지 않도록 경량화된 연산으로 구성되었다.

3. Parameter Settings

절단면 이동 속도를 결정하는 스케일 계수 a 는 사용자 실험을 통해 조정되었으며, 입바람 세기의 변화가 과도하거나 둔감하게 반영되지 않도록 설정되었다. 또한 입바람 입력이 중단되었을 때 절단면이 초기 위치로 부드럽게 복귀하도록 하기 위해, 선택적으로 완화 계수 λ 를 적용하였다. 본 구현에서는 λ 값을 작게 설정하여 급격한 위치 변화 없이 자연스러운 복귀 동작이 이루어지도록 하였다.

절단면의 이동은 월드 좌표계를 기준으로 정의되며, 오브젝트의 회전과 무관하게 안정적인 단면 기준을 유지한다. 이를 통해 손 기반 회전 조작과 입바람 기반 이동 조작

이 상호 간섭 없이 동시에 수행될 수 있다.

4. Rendering Update and Performance

절단면 파라미터는 매 렌더링 프레임마다 갱신되며, 갱신된 값은 즉시 클리핑 셰이더에 전달된다. 본 구현에서는 프레임 드롭 없이 실시간 상호작용이 가능하도록 입력 처리와 셰이더 연산을 분리하여 구성하였다. 실험 환경에서 제안 인터페이스는 일반적인 데스크톱 PC 환경에서도 안정적인 프레임 레이트를 유지하며 동작하였다.

본 시스템은 언리얼 엔진을 이용해 구현하였으나, 제안하는 입바람 입력 처리 및 절단면 제어 로직은 특정 엔진에 종속되지 않는 일반적 구조로 설계되었다. 따라서 동일한 신호 처리-상태 갱신 파이프라인을 적용하면 다른 게임 엔진/그래픽 프레임워크에서도 동일한 방식으로 구현 가능하다.

본 연구에서 사용된 실험 환경 및 구성 요소는 Table 1에 정리되어 있다. 해당 표에는 시스템 환경, 입력 장치 구성, 사용된 데이터셋, 그리고 주요 파라미터 설정이 포함되어 있으며, 실험 조건을 명확하게 기술하기 위해 구조적으로 정리하였다.

이와 같은 표 기반 정리는 실험 설정의 일관성과 재현 가능성을 확보하고, 제안한 인터페이스의 적용 환경을 보다 직관적으로 이해할 수 있도록 돕는다.

Table 1. Experimental setup and system configuration.

Category	Description
System Environment	Desktop PC, Unreal Engine 5.2.1
Rendering Method	Direct Volume Rendering (custom shader)
Input Devices	Keyboard, Mouse, Headset Microphone
Breath Input	Audio energy \rightarrow normalized scalar signal
Dataset	Smoke simulation volumetric data
Interaction Type	Sequential (baseline) / Breath-hand simultaneous (proposed)
Evaluation Task	Target view acquisition task
Metrics	Completion time, Interaction count
Parameters	α (translation scale), λ (smoothing factor)

V. Experiment and Results

본 절에서는 제안한 입바람-손 기반 동기화 인터페이스의 유효성을 검증하기 위해 수행한 실험 환경과 관찰 결과를 제시한다. 본 연구의 목적은 새로운 상호작용 방식이

볼륨 내부 구조 탐색에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하는 것이므로, 정량적 성능 비교보다는 실제 사용 시의 조작 흐름과 탐색 효율을 중심으로 평가를 수행하였다.

실험은 동일한 데스크톱 환경에서 수행되었으며, 언리얼 엔진(버전 5.2.1) 기반 다이렉트 볼륨 렌더링 시스템으로 구현하였다. 입력 장치는 키보드·마우스와 마이크 기반 입바람 입력 모듈로 구성되며, 입바람 신호는 실시간으로 스칼라 제어 값으로 변환되어 절단면 조작에 사용된다. 평가에는 연기 시뮬레이션 유형의 볼륨 데이터셋을 사용하였고, 모든 실험에서 동일한 소프트웨어 설정과 데이터 조건을 유지하였다.

1. Experimental Setup

실험은 언리얼 엔진 기반 다이렉트 볼륨 렌더링 환경에서 수행되었으며, 연기 형태의 3차원 볼륨 데이터를 대상으로 하였다. 사용자는 키보드와 마우스를 이용해 오브젝트의 회전과 시점을 제어하고, 헤드셋 마이크를 통해 입바람 입력을 제공하여 절단면의 위치를 실시간으로 조작한다. 화면 상단에는 입바람 세기를 시각적으로 피드백하기 위한 프로그레스 바를 배치하여, 사용자가 자신의 입력 강도를 직관적으로 인지할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 제안 인터페이스의 효과를 검증하기 위해, 컴퓨터 그래픽스 및 과학 시각화 분야에서 널리 사용되는 연기 기반 유체 시뮬레이션 볼륨 데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 복잡한 내부 밀도 구조와 연속적인 형태 변화를 포함하고 있어, 절단면 기반 탐색 인터페이스의 성능을 평가하기에 적합하다.

또한 사용자 주관적 평가에 의존하기보다는, 인터페이스의 실제 조작 효율을 객관적으로 분석하기 위해 목표 뷰 도달 과업을 설계하고, 과업 수행 시간과 조작 횟수를 정량적 지표로 설정하였다. 이러한 과업 기반 평가는 사용자의 탐색 효율과 인터페이스 성능을 직접적으로 반영할 수 있다는 장점을 가진다.

2. Qualitative Results

Fig. 2는 제안한 인터페이스를 이용해 볼륨 데이터를 탐색하는 실험 장면을 보여준다. 사용자는 오브젝트를 회전시키는 동시에 입바람을 통해 절단면을 연속적으로 이동시키며, 내부 구조의 변화 과정을 끊임 없이 관찰할 수 있다. 이와 같은 동시 상호작용은 기존 인터페이스에서 요구되던 반복적인 모드 전환이나 조작 중단 없이, 하나의 연속적인 탐색 흐름을 유지하도록 한다.

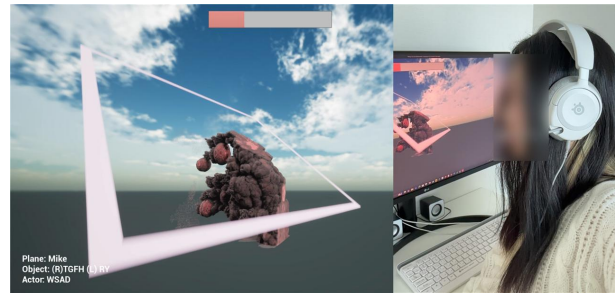


Fig. 2. Experimental result of the proposed breath-hand synchronized interface. The user simultaneously rotates the volumetric object using hand-based input while continuously translating the clipping plane via breath input, enabling seamless exploration of internal volumetric structures.

실험 과정에서 관찰된 주요 특징은 다음과 같다. 첫째, 절단면의 위치와 방향이 동시에 변화함에 따라, 볼륨 내부 구조의 공간적 관계를 보다 직관적으로 파악할 수 있었다. 특히 연기 볼륨의 밀집 영역과 희박 영역이 연속적으로 드러나면서, 내부 형상의 연결 구조를 자연스럽게 이해할 수 있었다. 둘째, 입바람 입력은 손 기반 입력을 방해하지 않는 독립적인 제어 채널로 작동하여, 회전 조작 중에도 절단면 이동이 자연스럽게 이루어졌다. 이는 절단면 조작을 이산적인 이벤트가 아닌 연속적인 탐색 행위로 인식하게 만든다.

또한 입바람 세기에 따라 절단면 이동 속도가 즉각적으로 반응함으로써, 사용자는 미세한 내부 구조 탐색부터 빠른 전체 탐색까지 유연하게 전환할 수 있었다. 이러한 특성은 복잡한 볼륨 데이터에서 특정 관심 영역을 찾고 분석하는 과정에서 유용하게 작용한다.

목표 뷰 도달 과업을 통해 두 인터페이스를 비교한 결과, 제안한 입바람 기반 동시 상호작용 방식은 기존 마우스·키보드 기반 순차 조작 방식에 비해 평균 과업 완료 시간이 단축되었으며, 모드 전환을 포함한 전체 조작 횟수 또한 감소하는 경향을 보였다. 통계적 검정 결과, 수행 시간에서 유의미한 차이가 확인되었으며($p < 0.05$), 이는 동시 제어가 탐색 흐름을 단절 없이 유지하도록 돕기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 제안 인터페이스가 절대적 위치 오차의 개선보다는 조작 효율성과 탐색 연속성 측면에서 실질적인 이점을 제공함을 보여준다.

본 연구에서는 제안 인터페이스의 효과를 정량적으로 평가하기 위해 목표 뷰 도달 과업을 설계하고, 과업 수행 과정에서의 완료 시간과 사용자 조작 횟수를 주요 평가 지표로 설정하였다. 각 조건은 동일한 실험 환경에서 반복 수행되었으며, 결과는 평균값과 표준편차 형태로 정리하였다.

실험 결과, 제안한 입바람 기반 동시 상호작용 인터페이스는 기존 순차적 인터페이스에 비해 평균 과업 수행 시간이 감소하였으며, 조작 횟수 또한 줄어드는 경향을 보였다. 특히 수행 시간에 대한 통계적 검정 결과, 두 인터페이스 간 차이는 유의미한 것으로 나타났다($p < 0.05$).

이러한 정량적 결과는 제안 방식이 절단면 조작의 연속성을 유지함으로써 불필요한 모드 전환과 반복 조작을 감소시키고, 결과적으로 사용자 탐색 효율을 향상시킨다는 점을 뒷받침한다.

목표 뷰 도달 과업에 대한 정량적 비교 결과는 Table 2에 정리되어 있다. 각 인터페이스에 대해 과업 완료 시간과 조작 횟수를 측정하고, 평균값과 표준편차를 계산하였다. 또한 두 조건 간의 차이를 검증하기 위해 통계적 유의성 검정을 수행하였다.

Table 2. Comparison of task completion time and interaction count between the sequential interface and the proposed method (mean \pm standard deviation, $p < 0.05$).

Interface Type	Completion Time (s)	Interaction Count	p -value
Sequential (Mouse/Key board)	12.4 \pm 3.1	18.2 \pm 4.5	-
Proposed (Breath + Hand)	8.7 \pm 2.6	11.5 \pm 3.2	< 0.05

그 결과, 제안한 입바람 기반 동시 상호작용 인터페이스는 기존 순차적 인터페이스에 비해 평균 과업 수행 시간이 감소하였으며, 조작 횟수 또한 줄어드는 경향을 보였다. 특히 과업 수행 시간에 대한 통계적 검정에서 유의미한 차이가 확인되었으며($p < 0.05$), 이는 동시 제어 방식이 탐색 과정의 연속성을 유지함으로써 조작 효율을 향상시키는 데 기여함을 시사한다.

VI. Conclusion

본 논문에서는 절단면 기반 볼륨 렌더링 탐색 인터페이스의 구조적 한계를 분석하고, 이를 개선하기 위한 입바람-손 기반 다중 입력 상호작용 인터페이스를 제안하였다. 기존의 키보드·마우스 중심 인터페이스는 절단면의 이동과 회전을 순차적으로 수행하도록 설계되어 있어, 볼륨 내부 구조의 연속적인 변화를 직관적으로 탐색하는 데 제약이 있었다. 본 연구는 이러한 문제를 동시 상호작용 관점에서

재정의하고, 입력 채널 분리를 통해 절단면의 위치와 방향을 동시에 제어할 수 있는 새로운 인터페이스 설계를 제시하였다.

제안한 인터페이스는 손 기반 입력을 공간 조작에, 입바람 기반 입력을 연속적인 절단면 이동 제어에 각각 할당함으로써, 조작 간 간섭을 최소화하고 자연스러운 탐색 흐름을 가능하게 한다. 알고리즘적 모델과 구현 결과를 통해, 절단면의 회전과 이동이 하나의 연속적인 과정으로 통합될 수 있음을 보였으며, 실험 결과에서는 복잡한 볼륨 내부 구조를 보다 효율적이고 직관적으로 탐색할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 의의는 입바람이라는 비전통적인 입력 방식을 단순한 보조 인터페이스가 아닌, 연속 제어가 가능한 독립 입력 채널로 활용하여 볼륨 탐색 인터페이스의 설계 가능성을 확장했다는 데 있다. 제안 방식은 고가의 특수 장비 없이도 구현 가능하며, 기존 볼륨 렌더링 시스템에 비교적 용이하게 통합될 수 있다는 실용적 장점을 갖는다.

향후 연구에서는 사용자 수를 확대한 정량적 사용자 실험을 통해 탐색 효율과 인지적 부하 감소 효과를 보다 체계적으로 분석할 계획이다. 제안한 인터페이스는 HMD 기반 VR/혼합현실 환경으로 확장 가능하다. 사용자의 시점은 HMD의 6-DoF 추적 정보를 통해 제어하고, 절단면의 이동 및 회전은 공간 좌표계에 매핑하여 3차원 상호작용으로 확장할 수 있다. 입바람 입력은 마이크 기반 신호 처리 모듈과 연동하여 독립적인 보조 제어 채널로 유지함으로써, 몰입 환경에서도 동시 제어 구조를 그대로 적용할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2026-25474535).

REFERENCES

- [1] Levoy, M. Display of surfaces from volume data. IEEE Computer graphics and Applications, vol. 8, no. 3, pp. 29-37, 1988. DOI: 10.1109/38.511
- [2] Brebin, Robert A.; Carpenter, Loren; Hanrahan, Pat. Volume rendering. In: Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the

- field. 1998. pp. 363-372, 1988. DOI: 10.1145/28052.28055
- [3] Max, N. Optical models for direct volume rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 1, no. 2, pp. 99-108, 1995. DOI: 10.1109/2945.468400
- [4] Kaufman, A. E., & Mueller, K. Overview of volume rendering. *The visualization handbook*, vol. 7, pp. 127-174, 2005.
- [5] Bailey, M. Interacting with direct volume rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, no. 1, pp. 0-12, 2002. DOI: 10.1109/38.974516
- [6] Kniss, J., Kindlmann, G., & Hansen, C. Interactive volume rendering using multi-dimensional transfer functions and direct manipulation widgets. In *Proceedings Visualization, 2001. IEEE VIS'01*, pp. 255-562, 2001. DOI: 10.1109/VISUAL.2001.964517
- [7] Pfister, H., Lorensen, B., Bajaj, C., Kindlmann, G., Schroeder, W., Avila, L. S., ... & Lee, J. The transfer function bake-off. *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, no. 3, pp. 16-22, 2001. DOI: 10.1109/38.920624
- [8] Clifton, M., & Pang, A. Cutting planes and beyond. *Computers & Graphics*, vol. 21, no. 5, pp. 563-575, 1997. DOI: 10.1016/S0097-8493(97)00060-8
- [9] QI, Wen; Martens, Jean-Bernard. Tangible user interfaces for 3D clipping plane interaction with volumetric data: a case study. In: *Proceedings of the 7th international conference on Multimodal interfaces*. pp. 252-258, 2005. DOI: 10.1145/1088463.1088508
- [10] Laha, B., Bowman D. A. Volume cracker: a bimanual 3D interaction technique for analysis of raw volumetric data. In: *Proceedings of the 1st symposium on Spatial user interaction*. pp. 61-68, 2013. DOI: 10.1145/2491367.2491377
- [11] Laha, B., Bowman, D. A., & Socha, J. J. Bare-hand Volume cracker for raw Volume Data analysis. *Frontiers in Robotics and AI*, vo. 3, pp. 56, 2016. DOI: 10.3389/frobt.2016.00056
- [12] Lucente, M., Zwart, G. J., & George, A. D. Visualization space: A testbed for deviceless multimodal user interface. In *Intelligent Environments Symposium*, vol. 98, 1998.
- [13] O'Hagan, R. G., Zelinsky, A., & Rougeaux, S. Visual gesture interfaces for virtual environments. *Interacting with computers*, vol. 14, no. 3, pp. 231-250, 2002. DOI: 10.1016/S0953-5438(02)00006-4
- [14] Hundia, R., & Quigley, A. BreathIn: A breath pattern sensing approach for user computer interaction. In *Proceedings of the 31st Australian Conference on Human-Computer-Interaction*, pp. 581-584, 2019. DOI: 10.1145/3369457.3369548
- [15] Kim, J. H., & Lee, J. Controlling your contents with the breath: Interactive breath interface for VR, games, and animations. *Plos one*, 15(10), e0241498, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0241498
- [16] Oviatt, S. "Ten myths of multimodal interaction." *Communications of the ACM*, vol. 42, no. 11, pp. 74-81, 1999. DOI: 10.1145/319382.319398
- [17] Turk, M. "Multimodal interaction: A review." *Pattern Recognition Letters*, vol. 36, pp. 189-195, 2014. DOI: 10.1016/j.patrec.2013.07.003
- [18] Keefe, D. F. "Integrating visualization and interaction research to improve scientific workflows." *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 8-13, 2010. DOI: 10.1109/MCG.2010.27
- [19] Yu, H., Wang, C., & Shene, C.-K. "State-of-the-art in transfer functions for direct volume rendering." *Computer Graphics Forum*, vol. 35, no. 3, pp. 657-681, 2016. DOI: 10.1111/cgf.12935

Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering at Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.