

## CAVE 기반 가상현실 최신 연구 동향

### Recent Research Trends of CAVE-based Virtual Reality

강동완<sup>1</sup>

Dongwann Kang<sup>1</sup>

요 약

1992년 시카고의 일리노이 대학 전자시각화 연구소에서 처음 개발된 CAVE는 Cave Automatic Virtual Environment의 머릿글자를 따서 만든 재귀적 축약어를 이용해 명명된 것으로서, 큐브 형태 방의 벽면에 프로젝터들을 투사하여 만드는 몰입형 가상현실 환경을 일컫는다. 초기 CAVE의 벽면은 프로젝션 스크린으로 구성되었지만, 디스플레이 기술의 발달로 점차 평면 패널 디스플레이가 보편화되고 있다. 컴퓨터에서 생성된 가상의 3차원 공간이 CAVE의 벽면을 통해 사용자에게 보여지는데, 사용자가 착용한 위치 및 방향 추적 장치가 장착된 특수 안경으로 인해 CAVE의 벽면에 보여지는 가상 환경은 실시간으로 사용자의 움직임에 맞춰 인터랙티브하게 갱신된다. 또한, CAVE에 여러 각도로 배치된 스피커들은 3차원 사운드를 제공함으로써 3차원 시각 경험을 더욱 효과적으로 보조한다. 본 연구에서는 CAVE의 역사와 최근의 연구동향에 대해 살펴보고, 향후 CAVE가 나아가야 할 길을 고찰한다.

핵심어 : CAVE, 가상현실, 확장현실, 가상환경

Abstract

The CAVE, which was first developed in 1992 at the University of Illinois Electronic Visualization Laboratory in Chicago, is named by using a recursive abbreviation for Cave Automatic Virtual Environment, and refers to an immersive virtual reality environment created by projecting virtual scenes onto the walls of its cube-shaped room. Initially, the walls of CAVE were composed of projection screens, but with the development of display technology, flat panel displays are employed recently. In this environment, a computer-generated virtual three-dimensional space is displayed to the user through the walls. Due to wearing special glasses equipped with a tracking device, the virtual environment shown on the wall displays the three-dimensional scene interactively according to the movement of the user. Moreover, the speakers placed at various angles in the CAVE provide a three-dimensional sound, assisting the three-dimensional presence effectively. In this study, we review the history and recent research trends of CAVE, and explore its future.

Keyword : CAVE, Virtual Reality, Extended Reality, Virtual Environment

<sup>1</sup> Department Computer Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea [Professor]  
e-mail: dongwann@seoultech.ac.kr

\* 본 연구는 본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2022년도 문화기술 연구개발 사업으로 수행되었음 (과제명 : XR CAVE 기반 메타버스 공간에서의 군집보행기술 개발을 위한 R&D 전문인력 양성, 과제번호 : R2022070014-0001, 기여율: 100%).

Received(December 9, 2022), Review Result(1st: December 22, 2022), Accepted(March 17, 2023), Published(March 31, 2023)



© 2023 The Authors. Published by NCISS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

## 1. 서론

CAVE는 Cave Automatic Virtual Environment의 머릿글자를 따서 만든 재귀적 축약어로서, 큐브 형태 방의 벽면에 프로젝터들을 투사하여 만드는 몰입형 가상현실 환경을 일컫는다. CAVE는 1992년 시카고의 일리노이 대학 전자시각화 연구소에서 처음 개발되어 [그림 1]과 같이 ACM SIGGRAPH 1992에서 발표 및 시연되었다 [1][2]. 과학 시각화 연구에 적합한 가상현실 환경을 만들고 원격의 슈퍼컴퓨터에서 수행되는 고성능의 응용들을 제어하기 위한 사용자 인터페이스를 제공하는 것이 최초 CAVE를 개발하게 된 동기였다.

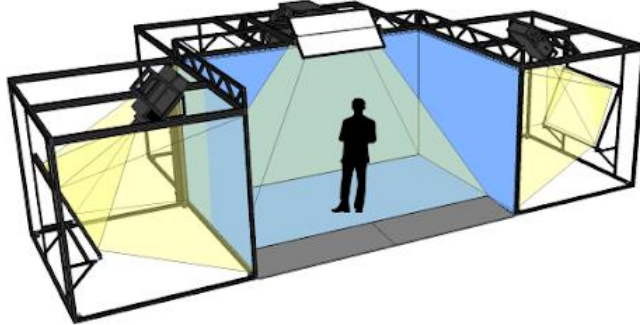


[그림 1] ACM SIGGRAPH 1992에서 시연중인 CAVE의 모습

[Fig. 1] The demonstration of CAVE in ACM SIGGRAPH 1992

일반적으로 CAVE는 [그림 2]와 같이 실내에 위치한 작은 큐브 모양 방 형태의 비디오 극장의 모습을 띄고 있다. 큐브형태가 사용된 것은 구를 근사하기 위함이다. CAVE의 벽면은 후면에서 투영되는 프로젝션 스크린으로 구성되는 것이 초기의 형태였지만, 디스플레이 기술의 발달로 평면 패널 디스플레이가 점차 보편화되고 있다. CAVE의 바닥으로는 천장에서 바닥으로 투사되는 하단 프로젝션 스크린이나 벽면과 마찬가지로 평면 패널 디스플레이가 사용된다. 사용자는 3D 안경을 착용하고 CAVE 환경에 참가하는데, 벽면 디스플레이는 컴퓨터그래픽스를 통해 렌더링된 3차원 그래픽을 스테레오스코피로 보여주기 때문에 사용자는 마치 3차원 객체들로 둘러싸인 공간속에 있는 듯 느끼게 된다. 또한, 3D 안경의 센서를 통해 사용자의 위치 및 얼굴방향이 끊임없이 추적되는데, 원격 컴퓨터가 사용자의 시점에 대응하는 3차원 그래픽을 계산하여 벽면에 재생하므로 사용자는 3차원 가상 공간을 돌아다니는 듯 한 입체감있는 시각 경험을 할 수 있게 된다. 이를 위해 초기 CAVE에서는 전자기 센서가 사용되었고, 이 때문에 자성이 없는 재료로 CAVE 환경을 구축해야 하는 제한이 있었다. 하지만 점차 적외선 센서로 대체되며 이러한 제약은 사라지게 되었다. 또한,

원격 컴퓨터는 시각적 측면 뿐만 아니라 청각적 측면에서도 입체감을 부여하기 위해 CAVE 공간의 사운드를 제어한다. 일반적으로 CAVE에는 여러 각도로 배치된 여러 스피커가 있어 3D 비디오를 보완 하는 3D 사운드를 제공한다.



[그림 2] 벽면 디스플레이들로 구성된 방 형태의 CAVE의 모습  
[Fig. 2] The appearance of cube-shaped CAVE consists of wall displays

## 2. CAVE 관련 연구들

### 2.1 CAVE의 시청각 시스템

CAVE 시스템에서 벽의 뒷편으로부터 후면 프로젝션 스크린으로 직접적으로 3차원 장면을 투사할 경우, 프로젝터에서 CAVE 공간을 향해 투사된 빛으로 인하여 CAVE내에 참여한 사용자에게 그림자를 드리우게 된다. 따라서 일반적으로는 이를 해결하고자 벽면에 직접적으로 투사를 하는 대신 거울을 통해 간접적으로 벽에 투사되도록 하였다. 프로젝터와 벽면 사이에 거울을 배치한 형태의 CAVE 시스템이 주로 사용되었고, 프로젝터로부터 투사된 장면이 벽면에 반사되어 보이도록 거울의 위치와 각도가 조절되었다. 따라서 사용자는 몰입감을 방해하는 사방의 벽에서 오는 빛이 만드는 어지러운 그림자를 보지 않아도 되었다. 초기 CAVE는 전면과 좌우측 벽면에만 투사를 하는 3면 형태로 사용되었으나, 후면까지 투사를 하는 형태의 CAVE [3]가 등장하였고, 최근에는 [그림 3]과 같이 바닥과 천장에도 디스플레이가 투사되는 6면 CAVE가 등장하기도 하였다 [4].

사용자가 착용하는 3D 안경은 액정 셔터 안경으로 프로젝션 시퀀스와 적외선으로 동기화된다. 프로젝터는 벽면에 좌우 시점에 대응하는 3차원 장면을 교대로 투사하는데, 이것이 안경의 셔터와 동기화되므로 사용자는 스테레오스코피로 인한 3차원의 시각적 경험을 갖게 된다. 일반적으로 CAVE 디스플레이의 주사율은 120Hz가 사용되는데, 한 프레임의 재생을 위해 양쪽 시점의 장면이

요구되므로 사용자가 체감하는 주사율은 60Hz에 해당한다 [5]. 이러한 셔터 글라스 방식의 안경은 편광 프로젝터와 편광 안경으로 대체될 수 있다. 또한, [그림 4]와 같이 안경에는 사용자 머리의 위치와 방향을 추적할 수 있게 해주는 센서가 장착되어 있어 사용자의 시점이 변함에 따라 CAVE 벽면에 투사되는 장면이 실시간 업데이트 될 수 있도록 한다.



[그림 3] 6면 CAVE의 모습. 사방의 벽뿐만 아니라 천장과 바닥에도 장면이 투사된다.

[Fig. 3] A six-sided CAVE. Scenes are projected not only on the walls on four sides, but also on the ceiling and floor.



[그림 4] CAVE에서 사용되는 셔터 안경. 머리 추적 센서가 장착되어 있다.

[Fig. 4] Shutter glasses used in CAVE. It is equipped with a head tracking sensor.

CAVE는 사용자에게 몰입감을 부여하기 위해 3차원의 입체적 시각 효과를 제공하지만, 사운드를 통해 이를 더욱 강화한다. 초기 CAVE 시스템에서는 지향성 사운드를 통해 입체 음향을 제공하고 자 하였다. 머리전달함수(Head-related transfer function)와 같은 사용자 머리 방향에 따른 3D 오디오 기술이 있었으나, 이는 한명의 사용자에게만 가능하였기 때문에 CAVE에서 사용되기엔 한계가 있

었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 OpenAL API를 통한 공간 오디오 위치 지정이 사용되었다 [6]. 또한, 여러 개의 스피커를 CAVE공간에 배치하고 이를 제어하여 CAVE 공간에서의 오디오 몰입에 초점을 둔 연구도 수행되었다 [7].

## 2.2 CAVE의 상호작용

CAVE 공간에서는 상호작용을 위해 일반적으로 [그림 5]와 같은 지팡이(Wand)가 사용된다. 지팡이는 3차원 컨트롤러로써 CAVE와 상호작용할 수 있는 여러 개의 버튼들을 장착하고 있다. 초기 CAVE에서의 지팡이는 3차원 위치만을 추적할 수 있었지만, 이후 3차원 가속도 센서를 탑재한 것들이 등장하며 방향도 추적할 수 있게 되었다. CAVE 응용에 따라 지팡이의 버튼 및 움직임에 대한 대응을 설정할 수 있으며, 이 지팡이를 통해 CAVE 공간 속의 사용자는 가상 세계속의 오브젝트를 선택할 수 있고, 또한 가상환경속을 이동할 수 있다.



[그림 5] CAVE에서 사용되는 지팡이. 3차원 위치와 방향을 인식하고 버튼을 통해 상호작용할 수 있다.

[Fig. 5] A wand used in CAVE. It recognizes its three-dimensional position and orientation so that user can interact with it.

CAVE에서는 종종 햅틱 시스템이 입출력 장치로 사용되기도 하였다. CAVE 시스템에 무선 장갑을 통하여 햅틱시스템을 도입한 연구들에서는 [그림 6]과 같이 장갑을 통해 손가락의 움직임을 제한하고 햅틱 반응을 부여함으로써 가상세계 속 오브젝트와의 상호작용시 촉각적 측면에서의 몰입감을 극대화 하였다 [8]. 손의 햅틱 뿐만 아니라 제스처는 사용자 인터페이스의 하나로 널리 사용되고 있는데, CAVE에서도 이것이 활용된 바 있다. 2차원 비전 기반의 제스처 인식 시스템이 연구되어졌고, 이를 통해 거추장스러운 장갑이나 지팡이의 사용 없이 CAVE와 상호작용할 수 있는 기술이 개발되었다 [3].



[그림 6] CAVE에서 사용되는 햅틱 장갑. 가상 환경 속 오브젝트를 만질 때 햅틱 반응을 제공한다.

[Fig. 6] Haptic gloves used in CAVE. It provides a haptic response when touching an object in the virtual environment.

### 2.3 CAVE 응용

CAVE는 다양한 분야에서 응용되어 왔다. CAVE의 대표적인 응용 분야는 엔지니어링이다. 다수의 엔지니어링 관련 기업들이 제품 개발 및 개선에 CAVE를 활용하고 있다 [9]. 가상공간에서 제품의 프로토타입을 만들고 그것을 테스트해볼 수 있으며, 인터페이스에 대한 사전 테스트 역시 가능하다. 이를 통해 실제 제품의 개발 전에 기능의 개선이 가능하며, 이는 비용절감 및 생산성의 향상을 가져온다.

CAVE의 또다른 유용한 응용분야는 훈련이다. 가상환경은 접근성이 떨어지는 값비싸거나 위험한 장비 및 훈련환경이 요구되는 상황에 대한 훌륭한 대체제가 된다. CAVE 시스템을 이용한 지게차 운용 훈련 방법을 제안한 연구에서는 CAVE 환경 내에 지게차와 유사한 운전 시뮬레이션 장비들을 설치하고, 실제 지게차와 유사한 CAD모델을 제작하여 3차원 가상환경의 렌더링에 사용해 몰입감을 높였다 [10]. 슬로프나 좁은 반경을 가진 회전 구간, 과적상황 등 실제 지게차로 운전 연습을 하기엔 위험도가 있는 시나리오들에 대한 훈련을 제공함으로써, 안전한 환경 속에서 지게차 운전 기술을 습득할 수 있도록 하였다. CAVE 시스템은 발레 훈련에도 사용되었다 [11]. CAVE 공간에 설치된 Kinect를 통해 사용자의 발레 제스처를 인식하고 이를 발레의 동작들과 비교하여 피드백을 주는 방법으로 사용자를 훈련시킨다. 이때, CAVE는 적절한 피드백을 주기 위한 용도로 활용된다. 발레 제스처에 대한 시각화를 CAVE의 벽면 디스플레이에서 제공하는데, 사용자의 제스처 위에 피

드백을 오버레이하여 보여줌으로써 학습 효과를 높인다. CAVE는 자폐아동의 교육에도 활용되었다 [12]. 자폐아동이 도심에서 미아가 되는 시나리오를 가정하여, 가상공간상의 거리에서 주행중인 차량을 식별하고, 횡단보도와 신호등을 찾아 신호에 맞춰 길을 건너는 등의 훈련을 진행할 수 있는 시스템을 제안하였다.

CAVE는 예술 및 엔터테인먼트에도 활용된다. CAVE를 활용하여 가상현실에서의 풍부한 상호작용에 기반한 몰입형 저작 시스템 아키텍처를 제안한 연구에서는 사용자가 가상공간에서 자신의 작업물을 직접 눈으로 보고 손으로 조작해가며 만드는 것은 상당한 몰입감을 제공하며 새로운 형태의 작업을 가능케 하였다 [13]. CaveUT는 ‘언리얼 토너먼트 2004’ 게임을 CAVE 환경에서 즐길 수 있도록 개발되어 배포된 플랫폼이다 [14]. 이 플랫폼을 이용하여 사용자는 게임속에 직접 들어가서 플레이하는 듯한 몰입감을 느낄 수 있었다. 이 플랫폼은 해당 게임뿐만 아니라 가상 유적 체험 [15][16]과 교육 [17][18] 등의 분야에서도 활용되었다. 또한, 대중 과학의 관점에서 화성의 지형을 사용자들이 직접 체험할 수 있는 엔터테인먼트 시스템이 CAVE를 이용하여 제작되기도 하였다 [19]. 사용자들인 MarsVR이라 명명된 이 시스템에서 화성으로의 3차원 우주 비행을 경험하고, 화성고도에서의 순회 비행 및 표면으로의 착륙, 그리고 화성에서의 롤러코스터를 즐기으로써 화성에 대한 이해를 높일 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 디스플레이 벽면으로 둘러싸인 몰입형 가상현실 환경인 CAVE의 특징에 대해 알아보고 그 발전 과정을 조사하였다. CAVE의 벽면을 통해 사용자에게 보여지는 가상의 3차원 장면은 사용자가 착용한 스테레오스코피 안경에 의해 입체감을 부여한다. 또한, 3차원 장면은 사용자의 머리 움직임에 따른 시점 변화에 맞춰 갱신되므로 사용자에게 몰입감을 선사한다. 3차원 사운드와 햅틱 장비들은 다중의 가상 감각을 제공함으로써 현존감을 높인다. 이러한 CAVE 시스템은 엔지니어링, 훈련, 예술 및 엔터테인먼트 등 다양한 분야에서 가상현실 응용을 위한 몰입형 환경으로써 활용되어져 왔다.

최근의 가상현실 기술들은 주로 HMD 착용을 전제로 하여 발전하여 왔다. CAVE는 비록 3D 안경 착용을 요구하지만, 거주장스러운 HMD에 비해 더 쾌적한 착용감을 제공하며 공간내 다른 참여자들을 실제로 볼 수 있게 한다는 이점을 갖는다. 하지만, CAVE 구현의 특성상 공간내 참여자들에게 동일한 시야를 제공할 수 밖에 없고, 참여자 각각이 머리 추적이 되는 3D 안경을 착용하고 있다 하더라도 각각에게 맞춤형 시야를 제공할 수 없다는 제약을 갖는다. 따라서 향후 CAVE가 더욱 다양한 응용으로 확대되거나 대중화되기 위해서는 CAVE 환경내 다중 사용자에게 개인 맞춤형 시야를 제공할 수 있는 디스플레이 또는 상호작용 기술이 개발되어야 할 것이다.

## References

- [1] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, R. V. Kenyon, J. C. Hart. "The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment", *Communications of the ACM*, vol. 35, no. 6, June 1992, pp. 64-73, doi: 10.1145/129888.129892.
- [2] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti, "Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE", *SIGGRAPH'93: the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, August 1-6, 1993, Anaheim, USA, pp. 135-142, doi: 10.1145/166117.166134.
- [3] M. Cabral, C. H. Morimoto, M. K. Zuffo, "On the usability of gesture interfaces in virtual reality environments", *CLIHIC'05: the 2005 Latin American conference on Human-computer interaction*, October 23-26, 2005, Cuernavaca, Mexico, pp. 100-108, doi: 10.1145/1111360.1111370.
- [4] K. Kim, M. Z. Rosenthal, D. Zielinski, R. Brady, "Comparison of desktop, head mounted display, and six wall fully immersive systems using a stressful task", *VWR'12: the 2012 IEEE Virtual Reality Workshops*, March 4-8, 2012, Costa Mesa, USA, pp. 143-144, doi: 10.1109/VR.2012.6180922.
- [5] R. V. Kenyon, "The CAVE (TM) automatic virtual environment: characteristics and applications", *the Human-computer Interaction and Virtual Environments*, April 26-27, 1995, Hampton, USA, pp. 149-168.
- [6] J. Symanzik, D. Cook, B. D. Kohlmeyer, C. Cruz-Neira, "Dynamic Statistical Graphics in the CAVE Virtual Reality Environment", *Dynamic Statistical Graphics Workshop*, July 7, 1996, Sydney, Australia, pp. 41-47.
- [7] R. R. A Faria, L. F. Thomaz, L. Soares, B. T. Santos, M. K. Zuffo, J. A. Zuffo, "Audience-audio immersion experiences in the caverna digital", *the 10th Brazilian Symposium on Computer Music*, October 3-5, 2005, Belo Horizonte, Brazil, pp. 106-117.
- [8] J. M. Hegie, A. S. Kimmel, K. H. Parian, S. M. Dascalu, F. C. Harris Jr, "WiELD-CAVE: wireless ergonomic lightweight device for use in the CAVE", *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, vol. 10, no. s2, September 2010, pp. S177-S186, doi: 10.3233/JCM-2010-0277.
- [9] S. Ottosson, "Virtual reality in the product development process", *Journal of Engineering Design*, vol. 13, no. 2, August 2002, pp. 159-172, 10.1080/09544820210129823.
- [10] K. K. Yuen, S. H. Choi, X. B. Yang, "A full-immersive CAVE-based VR simulation system of forklift truck operations for safety training", *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 7, no. 2, August 2010, pp. 235-245, doi: 10.3722/cadaps.2010.235-245.
- [11] M. Kyan, G. Sun, H. Li, L. Zhong, P. Muneesawang, N. Dong, B. Elder, L. Guan, "An approach to ballet dance training through ms kinect and visualization in a cave virtual reality environment", *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 6, no. 2, March 2015, pp. 1-37, doi: 10.1145/2735951.
- [12] S. Matsentidou, C. Poullis, "Immersive visualizations in a VR cave environment for the training and enhancement of social skills for children with autism", *VISAPP'14: 2014 International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, January 5-8, 2014, Lisbon, Portugal, pp. 230-236.
- [13] R. Blach, J. Landauer, A. Rosch, A. Simon, "A highly flexible virtual reality system", *Future Generation Computer Systems*, vol. 14, no. 3-4, August 1998, pp. 167-178, doi: 10.1016/S0167-739X(98)00019-3.



- [14] J. Jacobson, M. L. Renard, J. Lugin, M. Cavazza, "The CaveUT system: immersive entertainment based on a game engine", ACM SIGCHI'05: the 2005 International Conference on Advances in computer entertainment technology, June 15-17, 2005, Valencia, Spain, pp. 184-187, doi: 10.1145/1178477.1178503.
- [15] J. Jacobson, L. Holden, "Virtual heritage: Living in the past", *Techne: Research in Philosophy and Technology*, vol. 10, no. 3, Spring 2007, pp. 55-61, doi: 10.5840/techne200710312.
- [16] R. Gillam, C. Innes, J. Jacobson, "Performance and ritual in the virtual Egyptian temple", CAA'10: the 38th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, April 6-9, 2010, Granada, Spain, pp. 1-4.
- [17] J. Jacobson, M. Ellis, S. Ellis, L. Seethaler, "Immersive displays for education using CaveUT", EdMedia+ Innovate Learning, June 27, 2005, Montreal, Canada, pp. 4525-4530.
- [18] J. Jacobson, K. Handron, L. Holden, "Narrative and content combine in a learning game for virtual heritage", CAA'09: the 37th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, March 22-26, 2009, Williamsburg, USA, pp. 137-145.
- [19] R. Olanda, M. Perez, P. Morillo, M. Fernandez, S. Casas, "Entertainment virtual reality system for simulation of spaceflights over the surface of the planet Mars", VRST'06: the ACM symposium on Virtual reality software and technology, November 1-3, 2006, Limassol, Cyprus, pp. 123-132, doi: 10.1145/1180495.1180522.