

3차원 가상공간에서의 상호작용적 네비게이션 디자인

1부: 기초개념 및 기술

Interactive Navigation Design in 3-Dimensional Virtual Space

Part I : Basic Concepts and Techniques

김진희(Kim, Jin-Hee)

백제예술대학

1. 연구배경

- 1-1. 가상현실 대중화 시대의 도래
- 1-2. 연구범위
- 1-3. 기반기술현황

2. 개념 및 기술적 고찰

- 2-1. 네비게이션 디바이스
- 2-2. 네비게이션 기법
- 2-3. 네비게이션 기초개념
- 2-4. 네비게이션 최적화 기법

3. 결론

참고문헌

(要約)

가상현실 분야는 이제 대중화시대를 맞이하고 있다. 데스크탑 가상현실 산업은 다양한 Web VR 애플리케이션을 중심으로 급속히 성장하고 있는 추세이다. 3차원 가상공간에서 사용자 네비게이션의 수행은 가상의 공간에 설정된 논리적 구조를 인지하고 설정된 상호작용을 이해하며 길을 찾아가는 복잡한 과정이다. 그 것은 사용자가 임의로 설정하는 과정이 아니고 기획단계에서 면밀히 디자인되고 설계된 기술적, 기법적 그리고 개념적 과정인 것이다. 이에 따라 본 논고에서는 3차원 가상공간에서의 상호작용적 네비게이션과 관련된 기술적, 기법적, 그리고 개념적 기초이론들을 총체적으로 고찰하고 있다.

(Abstract)

Virtual Reality fields see the popularization era. Desk-top VR industries are under rapid development, concentrating on various Web VR applications. Performing user navigation in 3D virtual space is a complicate process in which one is looking for a way with understanding logical structures established in a virtual space and noticing established interactions. It is not a process established by a user, but a technical, skillful and conceptual process carefully designed and constructed at the pre-production stage. Therefore, in this paper technical, skillful and conceptual basic theories, related with the interactive navigation in a 3D virtual space, are thoroughly discussed.

(Keyword)

Navigation, Virtual Reality, Interactive 3D

1. 연구배경

1-1. 가상현실 대중화 시대의 도래

다양한 매체가 디지털 화 되면서 상호작용의 구현은 이제 선택이 아닌 필수 요소가 되었다. 한편 상호작용이 가능한 3차원 영상은 현재 가상현실프로젝트나 전문적인 게임제작에서 뿐만 아니라 보다 대중적인 멀티미디어 저작도구에서 기본적인 그래픽 사양으로 제공되고 있다. 즉, 상호작용이 가능한 3차원 영상은 컴퓨터 과학자와의 협동작업이나 작가 자신의 전문적인 프로그래밍 기술 없이도 이제 다양한 멀티미디어 저작도구를 활용한 일반적인 프로그래밍 기법으로 구현이 가능하여 다방면의 예술적 및 산업적 응용이 가능한 도구로 예술가나 컴퓨터그래픽 디자이너에게 빠르게 대중화되고 확산될 전망에 있는 것이다. 그동안 멀티미디어 저작도구에서 3차원 영상의 상호작용이 지원되지 않았던 까닭은 그 가능성이 소프트웨어 상에서 지원이 된다고 하더라도 그것의 대중적인 하드웨어 기반이 불충분하였기 때문이었다. 즉, 멀티미디어 저작도구 개발업체들은 대중적인 컴퓨터 사양에 발맞추어 3차원적 이미지의 실시간 렌더링이 가능한 저급의 하드웨어적 환경에 합당한 상호작용적 3차원 환경의 소프트웨어 사양을 근간에서야 출시하게 된 것이다. 상호작용이 가능한 3차원 영상의 예술적 그리고 산업적 응용 가능성과 이를 뒷받침할 컴퓨터하드웨어 기반의 무한한 발전성은 고려해 볼 때 관련 소프트웨어 업체들은 앞으로 더욱 앞 다투어 이러한 소프트웨어 환경을 심화 발전시켜 나아갈 전망이다. 상호작용으로 전개되는 3차원 영상의 연구는 기술적 및 기사재적 연구여건을 갖춘 일부 연구기관의 가상현실 연구나 게임제작사의 오락용 게임 시뮬레이션에서 주로 다루어져 왔으나 앞서 기술한 바와 같이 이제 대중화 시대를 맞이함에 따라 보다 대중적인 수요가 예상 되는 바 이에 대한 다양한 접근기법에 대한 고찰이 시대적으로 요구되고 있다. 그 중에서도 네비게이션 전개기법은 상호작용으로 전개되는 3차원 영상작품의 전개상에서 가장 핵심적인 표현의 도구가 되므로 그 무엇보다 이에 대한 고찰이 필요시 된다고 하겠다.

1-2. 연구범위

이 연구는 사용자와의 상호작용으로 전개되는 3차원 영상을 대상으로 한다. 가상현실이 사용자로 하여금 가상으로 만들어진 세계를 현실과 가깝게 여기도록 하는 기술 및 표현에 역점을 둔 개념이라면 상호작용적 3차원 영상은 가상세계와 사용자와의 상호작용의 설정 및 표현에 중심을 둔 개념으로서 Interactive Art 및 그의 산업적 응용분야에 속하는 개념으로 구분 짓는 것이 조금 더 가깝다고 말할 수 있겠다. 그러나 이 영역은 가상현실 연구 분야와 밀접한 관련성을 갖는다. 그 이유는 두 영역은 서로 따로 분리된 영역이 아니며 서로 공유되는 부분이 크기 때문이다. 그래서 상호작용적 3차원 영상의 네비게이션 연구 또한 가상현실 분야에서 가상현실 연구의 부분적 내용으로 발표된 사례가 많으며 제시되는 논문에서도 그러한 내용들을 기반으로 하고 있다. 가상현실 연구에서는 그 안의 내용으로 전개되는 상호작용적인 3차

원 영상 뿐 아니라 사용자에게 그 영상에 몰입감이나 실존감을 증대시켜주기 위한 여러 가지 형태의 인터페이스에 대한 연구가 핵심적인 부분이 된다. 그 형태는 매우 다양하여 HMDs란 장치로 대표되는 몰입형 가상현실과 투영되는 이미지 방식인 CAVE(Cave Automatic Virtual Environment)¹⁾ 형태 및 실사 비디오 이미지에 가상이미지를 덧붙이는 증강현실(Augmented Reality)에 이르기까지 매 연구기관이나 연구프로젝트마다의 특징에 따라 새로운 형태가 개발되고 있는 실정이다. 그리고 다소 제한된 환경을 제공하는 몰입데스크(Immersive Desk)형이나 일반대중적인 컴퓨터 환경의 데스크탑형도 가상현실의 범주에 속한다. 결론적으로 이 연구는 사용자와의 상호작용에 대한 컴퓨터 입출력 인터페이스가 어떠한 형태이던 간에 관계없이 내부적 가상 이미지로 존재하는 가상세계 안에서의 사용자 상호작용적인 내용의 전개를 대상으로 한다. 본 연구의 1부(Part I)인 이 논문에서는 상호작용적 3차원 공간에서의 네비게이션 전개에 대한 기초적 이론과 및 기술 그리고 기법적인 요소들을 고찰하고 있고 2부(Part II)에서는 세계적인 연구기관 및 학교에서 시행된 바 있는 네비게이션과 관련된 독창적인 가상현실 연구사례들을 기반으로 네비게이션을 지원해 줄 수 있는 다양한 개념들을 좀 더 심화하여 고찰해보고 있다.

1-3. 기반기술현황

본 연구는 대중적인 저작도구를 기반으로 제작 가능한 3차원 가상세계에서 내부적으로 전개되는 네비게이션에 대한 연구 및 고찰이므로 주요한 기술적 기반은 그 상업적 전망이 밝은 응용 분야인 Web3D의 영역이라고 볼 수 있다. Web3D 기술은 표준기술기반과 더불어 많은 주변기술들이 접목되어 보다 진숙한 개발자 환경의 다양한 상업적 상호작용적 3D 저작기반기술이 확충되고 있고 앞으로도 급속히 발전될 전망에 있다. 이와 관련하여 오늘날 수많은 관련 기술들이 있으나 주요하게는 다음과 같은 개념들이 근간을 이룬다. 3D게임엔진이란 3차원게임을 제작하기 위하여 사전에 개발된 소프트웨어 라이브러리를 의미한다. 3D브라우저란 게임을 위해 개발된 것은 아니나 웹 브라우저 상의 상호작용적 3차원 가상현실 콘텐츠를 생성할 수 있는 3D게임엔진이라고 볼 수 있으며 이 기술은 VRML을 기반으로 할 수도 있고 아니면 관련 업체에서 개발된 기술이 접목된 경우 일 수도 있다. 그리고 또 인터넷상에서 디지털 동영상데이터를 다운로드 받으면서 동시에 동영상을 재생해 줌으로서 실시간 효과를 극대화시켜 주는 스트리밍(Streaming) 기술 등이 활용된다. 이외에도 최적화(Optimizing)기술과 압축(Compression)기술 등의 다양한 컴퓨터그래픽 기반기술들을 기초로 한다. 다음에 기술될 명칭들은 수많은 기술들 중 일부 대중적인 활용도가 높은 기술

1) CAVE(Cave Automatic Virtual Environment)는 Illinois Chicago Circle 대학에서 처음 소개한 바 있는 surround-projection 기술을 사용하는 VR installation을 말한다. 둘러싸여진 3개에서 6개의 직사각형 rear-projection 스크린에 이미지 제작 시스템에서 정확하게 coordinate 된 각각의 이미지들을 맞추어 투영시킨다.

들의 예로 인터넷상에서 검색한 자료에서 인용한 것이다[4]. 그 다음에는 Web3D 표준기술과 그의 역동적인 콘텐츠구성을 위한 확장기술과 마지막에서는 그 외의 주변기술들 중 한 예를 기술적으로 고찰해보고 있다.

• Single User 3D Game Engines

- Quake(<http://www.idsoftware.com>)
- Unreal(<http://www.epicgames.com>)
- Crystal Space(<http://www.crystal.linuxgames.com>)
- Lithtec 3D(<http://www.lithtec.com>)
- WildTangent(<http://www.wildtangent.com>)

• VRML과 유사한 3D Browsers

- Cosmo Player(<http://www.cai.com>)
- OZ Virtual
- Blaxxun(<http://www.blaxxun.com>)
- WorldsPlayer(<http://www.worlds.com>)
- Cosmo Player(<http://www.cai.com>)
- Adobe Atmosphere(<http://www.adobe.com>)
- Macromedia Sockwave 3D(<http://www.macromedia.com>)
- Virtools(<http://www.virttools.com>)
- ActiveWorlds(<http://www.activeworlds.com>)

• Streaming 3D Viewers

- Cult3D(<http://www.cult3d.com>)
- Shout3D(<http://www.shout3d.com>)
- Brilliant 3D Projector(<http://www.brilliantdigital.com>)
- HyperCosm(<http://www.hypercosm.com>)
- Kaon HyperSpace(<http://www.kaon.com>)
- RealityWave(<http://www.realitywave.com>)
- Viewpoint Media Player(<http://www.viewpoint.com>)
- Pulse Player(<http://www.pulse3d.com>)
- WildTangent(<http://www.wildtangent.com>)

• VR Standards

VR 표준기술로는 Web3D 컨소시엄(www.web3d.org)에 의하여 개발된 VRML/X3D와 Moving Picture Experts Group이 개발한 MPEG-4가 있다. VRML(Virtual Reality Modeling Language)은 입체, 체계적 변형(hierarchical transformations), 빛의 표현, 시점 그리고 재질 입히기와 같은 오늘날의 3차원 애플리케이션의 대부분의 표현기법을 정의하는 것이 가능한 인터넷 상호교환 형식에 하나이다. VRML의 확장형식인 VRMLX3D는 VRML에 추가적인 진보된 프로그래밍 인터페이스를 제공해주고 있다. MPEG-4는 통신 가능한 멀티미디어 애플리케이션을 위한 표준형식이다. 이것은 표준 오디오 및 비디오와 더불어 2D와 3D의 합성 콘텐츠를 지원한다. MPEG-4는 VRML/X3D상의 대부분의 장면 표현구조나 기능성을 기초로 한다.

• X-VRML

현재의 VRML/X3D와 MPEG-4 표준은 수동적인 미리 정해진 형태의 3차원 영상의 VR을 구성하기에는 충분하다. 스크립트 상에서 미리 정의하기에 따라 디자이너가 초기에 설정하는 애니메이션이나 장면내용의 변형 등이 가능하고 자유로운 네비게이션을 지원하지만 장면의 구조적 변형에는 아직 불충분하다. 액티브 VR 애플리케이션은 사용자 상호작용이 따라 보다 역동적으로 장면을 구성하는 것이 가능하다. X-VRML은 VRML/X3D와 MPEG-4와 같은 가상장면구성 표준형식에 다이내믹 모델링을 가능하게 하는 XML에 기초한 고 수준 절차(procedural) 언어이다. 이 언어는 프로그래머가 일일이 3차원 영상 표현을 서술하지 않고 정의하는 것만으로 표현이 가능한 접근방법을 제공하며 미리 만들어진 알고리즘들을 복잡한 장면을 구성하는데 사용할 수 있으며 객체지향형 프로그래밍기술의 사용도 지원하고 있다. 무엇보다도 액티브 데이터베이스 시스템은 제공되는 데이터베이스, 진행 중인 장면정보, 사용자 상호작용 그리고 수식적 알고리즘 및 무작위의 요소에 근거하여 끊임없이 진행 장면과 데이터를 실시간으로 바꾸는 가능하다. 이와 같이 X-VRML은 보다 능동적으로 데이터 발취가 가능한 VR 애플리케이션을 지원한다고 말할 수 있으며 결론적으로 PHP, JSP, ASP 또는 XLST 등등과 같이 웹상에서 역동적인 콘텐츠의 생성에 활용되는 DB기술들과 연동될 때 가장 큰 장점을 갖는다고 할 수 있다. X-VRML은 XML을 기초로 하기 때문에 그 저작에는 기존의 XML 저작 및 프로세싱 도구들을 활용할 수 있다. 또한 VRML기술은 단순한 CAD파일과 호환의 수준이 아닌 CAD기술과의 결합도 오래전부터 추진되어오고 있다.

• Shockwave 3D

다수 업체 및 기관들이 참여한 컨소시엄의 형식으로 만들어진 표준기술은 아니지만 전 세계적으로 단독한 사용자 층을 확보하고 있는 대중적인 멀티미디어 및 웹 애플리케이션의 저작 소프트웨어 제작사인 매크로 미디어사가 개발하고 보유한 Web 3D 기술로 Shockwave3D가 있다. 이 기술은 매크로 미디어사의 디렉터 8.5 상위버전을 비롯한 멀티미디어 저작 도구 상에서 제작된 애플리케이션 무비를 Web상에서 상연되도록 하기위한 기술로 고차원적 3차원 시각표현의 구현과 다이내믹한 상호작용의 애플리케이션을 웹상에 구현하는 것이 가능하도록 하는 기술이다. 매크로 미디어사의 소프트웨어들과 타사의 관련된 소프트웨어 간의 호환성과 연계적 활용을 기본적으로 제공하고 있으며 또한 플러그 인의 설치에 따라서도 다른 애플리케이션과의 연동이 가능하다. PC기반의 가장 대중적이며 표준적인 3차원 영상제작 전문 소프트웨어로 상용화되고 있는 오토데스크사의 3D Studio Max와 연계적 활용이 기본적으로 가능하며 영화, 게임, 그리고 방송 분야 활용에서의 고질의 3차원 영상과 애니메이션의 시장을 선도하는 Alias/Wavefront사의 MAYA와의 연계적 활용 또한 플러그인의 설치에 따라서 가능하다. Shockwave 3D 기술은 3차원 입체, 빛과 재질의 표현이 가능하고 고난위도 애니메이션의 표현이 가능하도록 해주는 Hierarchy의 설정이

가능하고 입자의 표현 및 중력의 적용 그리고 충돌 감지 등 등 다수의 기능을 제공한다. 또한 실시간 상호작용에 따라 3차원 입체, 빛, 재질 및 카메라 등 거의 모든 요소의 수정 및 변화가 가능하며 무엇보다 무비의 실행 시 사용자 시각이 좁아져 오는 경우 3차원 입체의 면 분할 수를 줄이거나 반대로 증진 되는 경우 실시간으로 면들을 더 분할하여 그 대상을 더욱 섬세하게 표현하는 것이 가능하여 사용자 상호작용 환경의 최적화가 가능하다.

2. 개념 및 기술적 고찰

2-1. 네비게이션 디바이스

데스크 탑형 애플리케이션의 경우에 사용자는 키보드, 마우스, 트랙 볼, 터치패드, 조이스틱 그리고 터치스크린 등 가장 기본적인 컴퓨터 입력 장치들을 활용하여 네비게이션을 조정하게 된다. 예를 들어 키보드에서 **↑**키를 누르거나 마우스를 위로 드래그 한다거나 조이스틱의 바를 앞으로 민 다던가 하면 사용자 시점은 앞으로 전진 하도록 하는 등등의 형태로 설정되게 된다. 몰입 형 가상현실에 사용되는 대표적인 장치인 HMDs는 사용자의 시각을 현실세계와 완전히 분리 가상세계로 완전몰입 시키는 형태의 디스플레이 장치로서 보통 HMDs에 장착된 추적 장치로부터 정보를 제공받아 머리움직임에 따라 변화하는 공간적 시각을 현실과 유사한 형태로 제시함으로써 가상세계에 현실감을 극대화시키며 사용자는 디스플레이 되는 그 공간적 시각을 통하여 가상세계를 인지하는 과정을 통하여 네비게이트하게 된다. 가상장갑(Virtual Glove)의 경우에는 인간의 가장 섬세한 동작기관인 손동작에서 유발된 데이터를 활용하여 다양한 상호작용 및 네비게이션의 조정에 활용하는 장치로서 특별히 근래에는 가상 수술과 같은 애플리케이션의 촉각적(Haptic) 상호작용 연구에서 힘의 피드백(force feedback)을 이용한 증강 현실에서의 적용이 활발하다. 현실세계에서 가장 기본적인 네비게이션 동작인 걷는 동작을 포함한 사용자의 몸동작에 대한 정보는 사용자의 몸에 부착하는 각종센서를 통하여서나 또는 실시간으로 캡처링(Capturing)되는 사용자에게 대한 실사 비디오 이미지의 분석을 통하여 컴퓨터에 전달되어 상호작용 및 네비게이션에 활용되어 질 수 있다. 노스캐롤라이나 채플 힐 대학에서 개발한 밝아 돌리는 바퀴(Treadmills) 역시 걷는 동작을 가상세계의 네비게이션에 적용시키는 장치로서 HMDs와 함께 사용되며 보조적으로 방향 바꾸는 것을 도와주는 방향조작스틱(Steering Bar)과 그 장치에서 떨어지는 것을 방지해주는 안전 지지대를 형성해주는 후프 형태의 프레임 있고 사용자는 슬라이딩 디바이스 위를 고무 샌들을 신고 걷게 된다. 3차원 입체 음향 장치는 사용자에게 음원의 거리감, 방향감각 그리고 공간감을 줌으로서 한층 현실감 있는 네비게이션 감각을 전달 할 수 있다. 다양한 환경 및 장치에 따라 네비게이션의 설계는 달라진다고 볼 수 있으며 새로운 형태의 장치들이 다양한 연구 프로젝트에 따라서 지속적으로 개발되고 있다.

2-2 네비게이션 기법

Joseph J. LaViola Jr.는 'Immersive VR for Scientific Visualization: A Progress Report[13]'에서 가상현실에서 상호작용에 대한 이론을 다음과 같이 체계화하여 제시하고 있다. 사용자의 3차원 영상의 상호작용 기법은 크게 3차원의 가상세계의 항해(Navigation)하는 행위, 어떤 대상을 선택(Selection)하는 행위 그리고 그 대상을 조작(Manipulation)하는 행위로 나누어 볼 수 있다. 그 중에서도 네비게이션은 사용자가 특정한 목표 없이 그 환경을 탐험(Exploration)하는 행위와, 특정 대상의 위치를 찾아 환경에서 움직여 찾아(Search)하는 행위 그리고 짧고 고도의 정밀한 동작을 일컫는 조작(Maneuvering)행위의 3가지 개념으로 구분하여 세분화 해 볼 수 있다. 그리고 또 다르게는 네비게이션을 장소에서 장소로의 시점의 물리적인 이동을 일컫는 여행(Travel)의 요소와 주변 공간에 대한 공간적 지식과 의식을 발달시키는 인지의 과정을 묘사한 개념인 길 찾기(Wayfinding)의 요소로 나누어 생각해 볼 수 있다. 그 중에서 전자의 경우인 물리적 현상을 나타내는 여행(travel)은 대부분의 경우 다음의 5개 요소들 중 하나의 상호작용에 속하게 된다.

- **Physical Movement:** 사용자 몸의 직접적 움직임에 의하여 환경을 여행하는 경우로 고정된 자전거와 같은 장치를 타서 페달을 작동시킨다거나 또는 트레드밀과 같은 장치 위에서 걷거나 몸에 센서를 부착하고 실제와 같이 걷는 등의 동작이 그대로 네비게이션에 적용된다.
- **Manual Viewpoint Manipulation:** 사용자의 손동작이 여행을 조정하는 경우이다. 키보드의 위 방향키를 누른 다던가 조이스틱의 바를 앞으로 민 다던가에 하는 동작에 의하여 시점을 앞으로 전진 하도록 설정하는 경우와 같은 예가 이에 해당된다. 대개의 적용에 컴퓨터 외의 특별한 부수적인 장치가 필요 없으므로 가장 일반적인 형태라고도 할 수 있다.
- **Steering:** 설정된 방향으로의 지속적인 움직임이 설정되는 경우를 말한다. 사용자가 응시하는 방향으로 지속적으로 움직인 다던가 두 팔을 뻗은 방향으로 날아가도록 설정되는 경우가 이에 속한다.
- **Target-based Travel:** 사용자가 목표점을 지정하면 애플리케이션이 자동으로 그 목표점에 도달하도록 해주는 기법을 말한다. 주로 중간과정을 생략하고 바로 접근하고자 하는 경우에 많이 사용되며 그 중간과정을 애니메이션의 형태로 사용자에게 디스플레이 해 줄 수도 있다.
- **Route Planning:** 사용자가 경로를 지정하고 사용자가 그 경로를 따라 움직이는 경우가 이에 속한다. 예를 들어 사용자가 지도위에 경로를 그리거나 실제의 환경에서 루트를 계획 할 수 있다.

2-3. 네비게이션 기초개념

• 3차원 좌표계

직각좌표계(rectangular coordinate system)는 원점(origin)을 기준으로 좌우로 뻗은 X축의 한 지점과, 위아래로 뻗은 Y축의 한 지점 그리고 앞뒤로 뻗은 Z축 상의 한 지점의 위치를 종합하여 3차원 공간상의 위치를 표현하는 기법으로 X, Y 그리고 Z축은 서로서로 직각을 이루게 된다. 이와 비교하여 구면좌표계(Spherical Coordinate System)는 원점(origin)의 기준 각(0°)을 기준으로 한 수평 각 및 고도 각(altitude angle) 그리고 원점과 대상 사이의 거리로 3차원 공간상의 위치를 표시하게 되며 특히 중앙의 대상을 관찰하는 카메라의 움직임의 표현에 효과적이다(그림 1). 보통의 경우 걷거나, 날거나, 또는 움직이는 물체를 타는 등의 진행적 네비게이션을 위해서는 직각좌표체계를, 대상을 관찰하는 카메라의 움직임과 같은 형태의 관찰적 네비게이션의 경우에는 구면좌표계를 활용하는 것이 효율적이다.

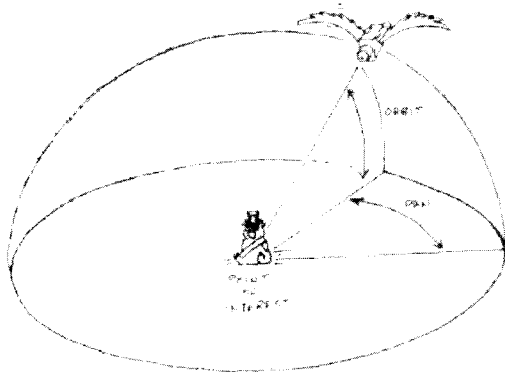


그림 1. 구면좌표계, [14] p33

• 시점(Viewpoint)

사용자는 3차원가상세계 속에서 가상의 시점을 통하여 보게 되는 가상공간의 이미지를 근거로 그 공간을 네비게이트하게 된다. 보통 이 시점은 한개 혹은 여러 개로 정의된 가상 카메라와 카메라 목표점과의 공간적 상대적 거리나 위치 등에 의하여 결정되게 된다. 눈높이시점은 인간의 걷는 네비게이션에 의하여 제공되게 되는 가장 기본적인 시점으로서 보통 바닥 면에서 사람의 키 높이만큼의 거리가 유지되도록 하는 시점을 말한다. 이 시점은 수평선과 일치하여 관객이 똑바로 앞을 보는 경우에 보이는 시각의 중앙에 수평선이 놓여지게 되며 가장 일상적이며 평등한 느낌을 제공하는 시점이다(그림 2). 새의 시점(Bird's Eye View)은 높은 시점에서 바닥 면을 내려다보는 형태의 시점이며 수평선은 보이는 시각에서 높은 위치에 있어 대부분의 보이는 대상들이 수평선 아래에 위치하게 됨으로서 다른 시점과 비교하여 관객들은 장면에 대해 상대적으로 많은 정보를 얻을 수 있고 관객들은 보이는 대상으로부터 우월감을 느끼게 되는 시점이다(그림 3). 벌레의 시점(Worm's eye View)은 보는 시점이 바닥 면과 매우

가까운 시점으로 수평선은 보이는 시각에서 매우 내려가 있으며 대부분의 보이는 대상들이 수평선 위에 위치하게 되고 상대적으로 보다 더 크고 더 가까워 보이게 됨으로서 관객은 대상으로부터 위압감을 느끼게 된다. 이외에도 다양한 개념으로 설정될 수 있다.

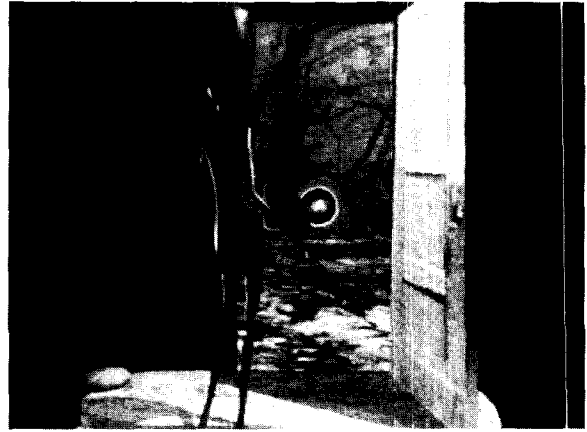


그림 2. 눈높이시점, At the Ground Level, Ho-zung Chou, 2001 [15]



그림 3. 새의 시점, Museum of Color, Anne Morgan Spalter [16]

• 카메라 네비게이션

카메라 네비게이션은 즉, 3차원 공간에서의 사용자 시점에 대한 변화를 지칭하는 것이며 카메라 자신의 X, Y, 그리고 Z축을 기준으로 카메라의 각도를 변화시키거나 3차원 공간좌표 상에서 카메라 위치를 이동시키는 방법으로 네비게이션을 실행시킬 수 있다. 카메라가 좌우로 움직이는 돌리(Dolly), 카메라가 앞으로 움직이는 트럭(Truck), 위 아래로 고개를 들거나 숙이는 방향으로 회전하는 틸트(Tilt), 위 아래로 움직이는 형태의 붐(Boom), 카메라가 보는 목표지점은 고정시키고 회전하는 롤(Roll) 그리고 카메라가 제자리에서 좌우로 360° 회전하는 팬(Pan) 등의 다양한 형태를 지닌다(그림 4). 이러한 움직임은 자유로이 움직이거나(Free) 걸거나(Walk) 달리거나(Run) 날거나(fly) 자전거, 자동차, 비행기 또는 엘리베이터와 같은 움직이는 기계장치(Moving Vehicle)를 타는 등

의 확장된 형태의 다양한 개념의 네비게이션으로 발전되는 기반이 된다.

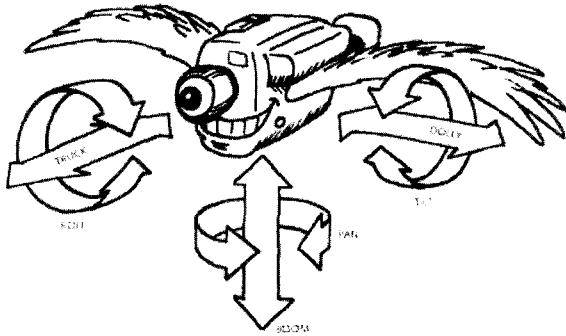


그림 4. 카메라 네비게이션, [14] p35

• 디스플레이 기법

- Panoramic Display

만들어지는 3차원 가상세계는 기본적으로 빈 공간이다. 그 공간에 배경이미지나 색 등을 적용할 수는 있지만 그러한 효과는 시점 변화에 따른 역동적인 배경을 전혀 디스플레이해 줄 수 없어 실존 감각을 현저히 저하시키는 요소가 된다. 현실과 같은 배경효과를 위해서는 360° 시각을 완전히 둘러싸는 연속적인 이미지가 필요하게 된다. 파노라믹 디스플레이는 보통 구, 실린더 혹은 사각에서 육각기둥 모양의 가상세계를 둘러싼 입체에 그 이미지를 적용하는 형태로 구성하거나 저작도구에서 지원하는 경우 파노라믹 배경으로의 설정을 활용할 수 있다. 파노라믹 이미지를 만들기 위해서는 보통 사진으로 360° 시각의 이미지를 얻은 뒤 이미지 프로세싱 기법으로 자연스럽게 연결되는 시각 및 원하는 그래픽 효과의 이미지를 제작하고 환경 입체에 적용하게 된다. 그림 5는 알고리즘을 활용하여 3개의 다른 시점의 이미지를 하나의 연속 선상의 파노라마 이미지로 재구성한 예이며 파노라마 비디오(Panoramic Video)의 경우에는 보다 역동적인 환경의 이미지를 제공할 수 있지만 대중적인 저작에의 활용에는 아직 많은 기술적 어려움이 따른다.

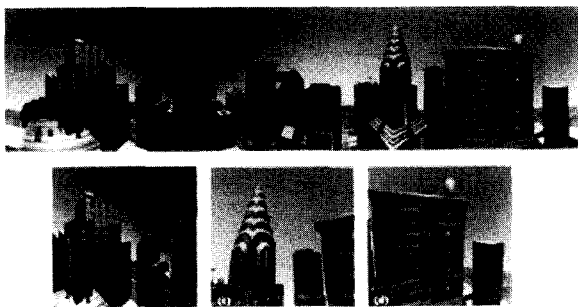


그림 5. Panoramic Display from City Scenes [18]

- Starfield Display

우주공간과 같은 무한한 공간의 이미지를 다차원적인 데이터베이스에 근거한 2차원의 흩어진 점들(2D scatter plots)로 표시하는 기법이다. 각 차원의 데이터베이스에 따라 그려질 점들의 위치는 각 차원에 따라 다른 축을 기준으로 우선순위에 따라 그려지게 되며 또한 각 차원에 따르는 색과 크기 및 패턴에 근거하여 시각적으로 구별되도록 그려지게 된다. 알고리즘의 적용으로 구현되는 경우 시점의 공간상의 이동 및 반짝이는 효과나 빠른 움직임에 따른 빛의 잔영과 같은 그래픽 효과로 확장시켜 구현될 수 있다.

- Multi-window Display

멀티윈도우 디스플레이 방식은 전체적인시각(overview)이나 세부시각(detailed view) 등 시점이 다른 다수의 윈도우를 동시에 디스플레이 하는 방식으로 각 윈도우의 크기나 위치 및 구성은 내용상의 필요성에 따라 다르게 설계되게 되며 사용자는 보통 단순히 필요한 윈도우를 클릭 함에 의하여 특정 윈도우의 활성화시키고 각 윈도우에 따라 다른 네비게이션을 선택적으로 진행시킬 수 있는 장점이 있다.

- Scrolling Display

스크롤 디스플레이 방식은 주로 내려다보는 형태의 3차원적 시각과 같이 그래픽 처리한 광역적인 2차원 이미지를 디스플레이 하는 방식에 흔히 사용되며 사용자는 네비게이트하고자 하는 방향의 윈도우 Edge로 포인터를 가져가면 그 방향으로 이미지가 더 디스플레이 되도록 자동스크롤 되게 된다.

- World within Worlds Display

이 개념은 안 반 아이크의 아르놀피니 결혼식과 같은 15세기 회화나 M. C. Escher의 20세기 드로잉에서의 반사되는 작은 공간 이미지속의 세계 또는 시퀀스의 형태로 보여 지는 현대 사진예술의 표현기법 등에서도 흔하게 발견되지만 이것은 컴퓨터그래픽기법으로 더욱 적극적 활용이 가능하다. 컴퓨터그래픽에서 이 개념을 정의하자면 가상공간의 좌표계 상에서 서로 떨어진 곳에 위치한 다른 차원의 공간으로의 엔트리를 현재의 공간 안에 만들어 놓음으로서 다차원적 공간이 무한적인 형태로 서로 링크될 수 있는 기술 및 개념을 말한다. 상호작용예술, 애니메이션, 비디오, 광고 등의 광범위한 컴퓨터그래픽 응용영역에서 활용되는 세계안의 세계 디스플레이 기법은 기술적인 이유로 활용될 수도 있고 표현적인 의미로 활용될 수 있는 것으로 분석된다. 그 활용 예는 무수히 많고 볼 수 있겠으나 1998년 시그라프 전자극장 프로그램에서 발표된 Dun Zhao 의 'The Eccentric Circle'이란 3D애니메이션 작품에서는 동양이미지와 서양의 살바도르 달리의 초현실주의 회화, '성 안토니우스의 유혹' 그리고 미론의 조각 '원반 던지는 사람'의 3개의 각기 다른 이미지가 3차원 애니메이션의 형태로 구현되었고 그 각기 다른 세계는 세계안의 세계 디스플레이 기법으로 연결되어 전개되었는데 이 경우는 개념적 의미로 그 기법이 활용된 예이다. 이 기법은 또한 모든 차원의 공간을 현재의 장면 상에 디스플레이 할 필요성이 없으므로 상호작용적 3차원 영상기법에서 활용 시 장면상의 부하(load)를 줄여주는 기술적 기법으로 활용될 수 있다. 이

때 관객은 한 세계에서 직렬연결방식 또는 그물방식 등 여러 가지 형태로 연결된 여러 개의 다른 세계로 선택적으로 이동하게 된다. 세계안의 세계 디스플레이 기법은 경우에 따라서 개념적 전개상의 방식으로 개념적으로 활용될 뿐만 아니라 동시에 장면상의 부화(load)를 줄여 원활한 네비게이션의 전개를 돕는 기술적 기법으로 활용될 수 있다.

• Navigation Indicators

특정 대상의 네비게이션과 관련된 상황 정보 등을 알려주거나 선택 그리고 진행 및 지시사항 등을 보조적으로 알려주는 문자 및 기호 등이 활용될 수 있다. 예를 들어 새의 시점에서 사용자는 대상의 고도의 변화와 같은 정보를 그래픽 적으로 인지하기 어렵기 때문에 수치상으로 나타내어지는 고도 변화에 대한 정보지시자가 필요할 것이며 혹은 움직이려고 하는 목표지점에 대한 숫자 및 문자정보가 필요시 되기도 할 것이다. 또한 화살표와 같은 기호의 형태로 전진, 후진, 우회전, 좌회전, 위 또는 아래와 같이 현재 진행되고 있는 카메라 시점의 방향성을 표시해주거나 다음 네비게이션에 대한 특정 지점 및 대상을 알려주기도 하며 작업의 수행 상태에 대한 정보를 알릴 수도 있을 것이다. 프롭트와 같은 기호는 보통 사용자의 현재의 위치를 알려 주는 그래픽 요소로 활용될 수 있으며 그것은 진행 중인 경로에 따라 하이라이트 된 현재의 위치를 나타내주는 선의 일부분으로 표시될 수도 있다. 이 위치 자가 시간에 따라서 진행됨으로서 진행되는 네비게이션에 대한 방향성을 인지할 수 있기는 하나 현재 움직이지 않고 제 자리에서 대기하는 경우에 앞으로 진행될 방향에 대한 확실한 정보 또한 항상 제시하기 위해서는 화살표와 같이 방향성의 의미도 전달할 수 있도록 하는 것이 사용자에게 가장 명확한 네비게이션 정보를 전달한다. 경로(Path)는 과거, 현재 그리고 미래를 포함한 개념으로 디자이너에 의해 미리 정해지거나 사용자에게 의해 가변적으로 정의된 것일 수도 있으며 사용자에게 의하여 즉흥적으로 실시간상에서 수행되어진 것일 수 있다. 자취(Trails)는 사용자에게 의하여 이미 수행된 네비게이션의 과거의 경로를 말하며 보통 사용자가 지나쳐간 경로의 부분과 그렇지 않은 부분의 경로는 다른 색이나 밝기로 설정함으로써 자취가 구별되도록 설정한다.

2-4. 네비게이션 최적화 기법

구현하고자 하는 가상세계가 방대한 경우이거나 상대적으로 구현에 많은 로드를 주는 사실적 가상환경의 경우 원활한 네비게이션의 구현을 위해서는 몇 가지의 최적화 기술 및 기법의 활용이 필요시 된다. 또한 실시간으로 처리 및 전송할 수 있는 정보의 양을 제한적이면서 물체의 세부적 디테일까지 실시간 상호작용으로 탐색이 가능하도록 지원해주어야 하는 인터넷 쇼핑몰과 같은 환경의 구현에 필요시 되는 기술이다.

• Procedural Mapping

컴퓨터그래픽에서 입체적 대상의 표면 이미지 맵은 외부소스로부터 온 한정된 픽셀을 가진 비트맵 이미지가 적용되는 경우와 알고리즘이 적용되어 프로그래밍으로 만들어지는 경우

의 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 상호작용적 3차원 영상에서 대상에 비트맵이 적용된 경우 사용자 시점이 대상에 매우 가깝게 접근하는 경우에는 섬세하지 못하게 표현된 표면 이미지 현상을 경험하게 되는데 그것은 고정적으로 입혀진 이미지소스 픽셀의 유한적 한계성 때문이다. 그러나 알고리즘을 활용한 절차 재질(procedural textures)을 적용하게 되는 경우에는 실시간상호작용에 따른 시점의 변화에도 전체이미지가 섬세한 사실성을 언제나 유지할 수 있다. 프랙탈 기법을 활용하면 산, 물 또는 잎의 표면과 같이 자연 현상적 이미지의 섬세한 표현이 가능하면서도 사용자 시점이 대상으로부터 가까워지거나 멀어지는 등의 네비게이션의 변화에도 적합한 이미지 상태 및 처리해야할 이미지 처리량의 최적화 상태를 항상 유지할 수 있다. Meta Creations사의 F. Kenton Musgrave는 우리가 가상의 행성을 만들고 그것이 사실적으로 묘사되었으며 또 그것이 실시간으로 우리와 상호작용한다면 우리는 거기서 어떤 미학을 느낄 수 있을 가를 몰으면서 가상의 우주를 건설하는 그의 프로젝트를 소개하고 있다. 항상 사실적인 묘사에 미학을 느껴왔던 그는 그림 6과 같이 사실적으로 묘사된 산과 호수 강과 바다의 지구행성 전체의 모습을 가상세계에 건설하고자 했다. 그 세계는 무한대로 가까게 접근될 수 있고 무한대로 멀어질 수 있는데 사실적 이미지의 가상 환경에서 이러한 네비게이션이 가능하기 위해서는 몇 가지의 기술적 구현이 필수적이었다. 첫째로 무한대로 멀어지거나 가까워질 경우에 따라서 가상세계이미지가 애니메이션 되면서도 적합한 사실성과 시각적 복잡성을 유지하는 것이 우선적으로 요구되었는데 그러기 위해선 일반적인 이미지 맵이 아닌 순차 맵의 적용이 요구되었다. 산, 구름 그리고 바다와 같은 많은 경우의 순차 맵은 알고리즘을 활용한 프랙탈 기법으로 구성되기 때문에 실시간상호작용에 따른 시점의 변화에도 전체이미지가 섬세한 사실성을 언제나 유지할 수 있으며 이 때 자연적인 대상의 변화양상을 표현하

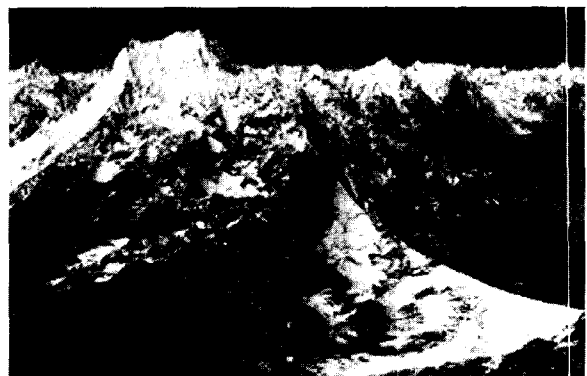


그림 6. Entirely Procedural Rendering: "Beneath the Rule a Country Lies", F. Kenton Musgrave, Meta Creation, 1999 [21]

기 위해서 무작위수도 활용되었다. 둘째로 관객의 시점이 가까워지고 멀어짐에 따라 대상을 묘사한 입체의 면 분할이 수 준을 조절하는 LODs기술도 필요시 되었다. 이 두 가지 기술은 궁극적으로 지구를 넘어 은하계 및 전체 우주를 가상세계

로 건설하여 관객이 대형스크린을 보면서 실시간으로 상호작용 할 수 있는 몰입환경을 제공하기 위한 것이었다.

• LODs

가상공간에서의 3차원 그래픽의 입체는 점, 선 그리고 면으로 구성된 폴리곤의 형태로 정의된다. 모델링 된 물체가 얼마나 많은 폴리곤으로 정의되어 있느냐, 즉 LODs(Level of Details)는 상호작용적이 아닌 일반적인 3D애니메이션에서는 물체와 카메라 사이의 거리에 적합하게 미리 제작 시 정의하여 이미지화(렌더링)하게 되고 고정된 형태로 관객에게 보여지게 된다. 하지만 상호작용적인 3차원 영상의 경우엔 카메라와 모델링된 물체와의 거리가 사용자와의 상호작용에 따라 가변적으로 변하게 되므로 시각적으로 적합한 LODs가 매 순간마다 다르게 된다. 가상세계를 바라보는 사용자 시점 즉, 카메라 시점이 바라보는 물체에 가까워지면 그 대상을 정의하는 면들은 분할되어 폴리곤의 수는 많아져서 그 물체가 더욱 섬세하게 보이도록 해야 할 것이며 반대로 멀어지면 보이는 대상들에 대한 시각이 그만큼 넓어지므로 실시간적으로 이미지화하여 화면에 표시해야하는 물체들 수 및 폴리곤의 수는 그만큼 많아지게 되므로 사용자에게 원활한 실시간 3차원 그래픽을 제공하기 위해서는 분할된 면의 수를 줄이는 것이 필요하게 된다. 결론적으로 사용자에게 원활한 네비게이션을 제공하기 위해서는 LODs의 실시간적 제어가 필요시 된다고 하겠다. LODs는 주로 폴리곤의 수가 줄어드는 경우에 SDSs(Subdivision of Surfaces)는 면 분할되어 폴리곤의 수가 많아지는 경우의 표현으로 활용된다.

• 물체의 실시간적 생성과 제거

상호작용적 3차원의 가상세계에서는 사실 실시간으로 사용자의 시각을 이미지화해야 하기 때문에 모든 조건의 최적화가 원활한 상호작용 및 네비게이션의 진행에 필수적인 요소가 된다. 프로그래밍 기법은 가상세계 내부적으로 만들어지게 되는 물체 모델의 리소스만을 애플리케이션의 시작부분에서 미리 설정해두고 실질적으로 가상세계에서 보이게 되는 입체 모델들은 필요시마다 실시간으로 생성하고 불필요하면 다시 실시간으로 제거하는 것이 가능하게 된다. 흔히 어드벤처 게임에서 볼 수 있는 끊임없이 이어지는 길이나 복도 형태의 반복적으로 이어지는 그래픽의 요소들은 이와 같은 방법으로 처리하는 것이 효율적이다.

• Texture-based Terrain Modeling

나타내고자하는 대상이 상대적으로 복잡한 입체적 표현이 요구되는 지형의 그래픽이고 실시간적으로 표시해야하는 영역이 넓다면 광범위한 스케일의 3차원 그래픽의 네비게이션의 원활한 디스플레이를 위해서는 그 지형이 입체화되고 그 위에 이미지 맵이 입혀지는 방식으로 디스플레이 하는 것보다는 지형적 입체를 재질화 된 이미지로 바꾸어 단순한 입체에 적용하는 기법이 활용될 수 있다. 다만 실질적으로 3차원 공간이 만들어지는 것이 아니라 이미지로만 착시효과를 만드는 기법이므로 적용 가능한 시점은 위에서 아래로 내려다보는 경우이다. 이 경우 목표하는 지형을 내려다보는 시점에서

는 실질적으로 지형을 입체화하여 재질을 입힌 경우와 커다란 그래픽 적 차이가 없지만 그래픽 구현에 필요한 수행요소들은 최소화시키게 되므로 원활한 네비게이션의 구현을 지원하게 될 것이다. 그림 7의 (a)는 지형의 높낮이에 따라 색채 이미지를 만든 것이고 (b)는 높낮이 데이터에 따라 부조 그림자 처리된 반사도 맵을 만든 것이며 (c)는 (a)와 (b)의 맵을 이용하여 만든 지형적 이미지이다.

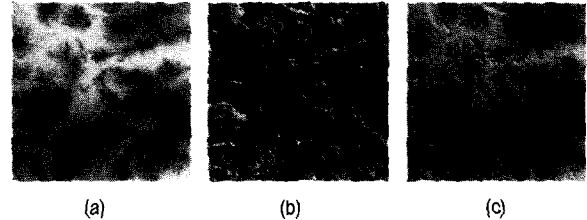


그림 7. Elevation visualization (a) Elevation postings: color-coded by height, (b) Reflectance map: elevation data is used to produce relief shading, (c) color-coded relief shaded elevation(a+b), [22]

• Distributed and Networked Environment

상호작용적 3차원 영상 애플리케이션도 하나의 사용자보다는 다수의 참여자를 지원하는 형식으로 발전하고 있다. 다수의 참여자를 지원하려면 기본적으로 다수의 컴퓨터 간에 통신 환경이 지원되어야 할 것이고 중앙 처리 방식보다는 분산처리 방식이 사용되어야 할 것이다. 분산처리 방식이란 대부분의 실시간으로 수행되는 그래픽 처리계산들을 분산된 다수 사용자 컴퓨터에서 수행하도록 처리하는 방식으로 다수 사용자 환경에서 생기는 중앙 컴퓨터의 그래픽 처리 로드를 현격히 줄여주어 원활한 상호작용을 돕는 방식을 말한다. 이러한 다수 사용자 환경에서의 콘텐츠의 설계 및 상호작용 방식과 네비게이션 디자인은 싱글 유저의 환경에서의 설계방식과는 많은 차이점을 가져올 수밖에 없을 것이다.

3. 결론

3차원 가상공간에서의 네비게이션은 공간에 대한 지속적인 인지의 과정과 함께 이루어지며 실시간적 이벤트의 형태로 진행되는 다이내믹한 과정이라 할 수 있다. 3차원 영상의 상호작용의 구현에서 효율적인 네비게이션의 설계는 아마 가장 중요하면서도 어려운 부분이라고 판단된다. 그러나 아직까지는 많은 사례에서 개념 없이 무계획적으로 표현한 형태가 쉽게 발견되고 있다. 특히 네비게이션의 디자인은 사용자 편의성이라는 측면에서 그 중요성을 더한다. 사용자 중심(User-centered)의 GUI(Graphical User Interfaces) 디자인이라는 개념은 어제 오늘의 이야기는 아니지만 날이 갈수록 그 중요성이 더욱 강조되고 있으며 예술 및 창의적 표현이라는 측면도 이제 사용자의 이해와 편의라는 측면과 더 이상 상충되는 개념으로 설정되어서는 안 될 것이다. 그러한 측면에서 사용자에게 편리하고 이해하기 쉬우며 창의적인 형태의 네비게이션 인터페이스를 제공하기 위해서는 체계적인 이론의 개념적 고찰과 다양한 접근기법의 탐구가 필수적이라고 하겠다. 그 중 이 논고에서는 기법 및 기술적 접근방법을 토대로 하는 상호

작용적 3차원 영상 네비게이션의 기본적인 이론들을 고찰해 보았는데 이러한 이론들은 실질적인 애플리케이션에서의 네비게이션 설계에 적용할 수 있을 것이다. 그리고 이 기초적 개념들은 2부(Part II)에서의 여러 가지 심화된 접근 개념들의 이해에 기본적인 토대가 되면서 그 심화된 개념들과 함께 조합되어 실질적 응용에서의 적용이 가능할 것으로 본다.

참고 문헌

- [1] Phil Gross and Mike Gross: Director 8.5 Shockwave Studio for 3D, macromedia Press, 1-784, (2001)
- [2] L. Miguel, Oliver Bimber, and Dieter Schmalstieg: Walk-up VR: Virtual Reality beyond Projection Screens, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 6, 19-23, (2000)
- [3] Mark Lawton: Advancing 3D through VRML on the Web, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, No. 2, 4-5, (1999)
- [4] SmartVR-Comparison of smartVerse and similar 3D technologies/ Information from World Wide Web, (2003)
- [5] Krzysztof Walczak and Wojciech Cellary: X-VRML for Advanced Virtual Reality Applications, IEEE Computer, Vol. 36, No. 3, 89-92, (2003)
- [6] Julien Berta: Integrating VR and CAD, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, No. 5, 14-19, (1999)
- [7] Alias/Wavefront Corporation: Alias/Wavefront Announces Maya Shockwave 3D Exporter Version 1.1, Digital Editor Online News, Digital Media Publishing, (1995-2001)
- [8] Frederick P. Brooks, Jr.: What's Real About Virtual Reality?, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, No. 6, 16-27, (1999)
- [9] Hiroo Iwata: The Torus Treadmill: Realizing Locomotion in VEs, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, No. 6, 30-35, (1999)
- [10] M. Fjeld, N. Ironmonger, S. Guttormsen Schar & H. Krueger: Design and Evaluation of Four AR Navigation Tools Using Scene and Viewpoint Handling, In proceeding of INTERACT, Tokyo, Japan, (2001)
- [11] Alexei Sourin, Olga Sourina, and Howe Tet Sen: Virtual Orthopedic Surgery Training, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 3, 6-9, (2000)
- [12] Jannick Rolland, Larry Davis, Yonggang Ha, Catherine Meyer, Vesselin Shaoulov, Avni Akcay, Haocheng Zheng, Robert Banks, and Benjamin Del Vento: 3D Visualization and Imaging in Distributed Collaborative Environments, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 22, No. 1, 11-13, (2002)
- [13] Andries van Dam, Andrew S. Forsberg, David H. Laidlaw, Joseph J. LaViola, Jr., and Rosemary M. Simpson: Immersive VR for Scientific Visualization: A Progress Report, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 6, 26-52, (2000)
- [14] Isaac Victor Kerlow: The Art of 3-D Computer Animation and Imaging, Van Nostrand Reinhold, New York, 1-43, (1996)
- [15] Gary Singh: Showing Off in 3D, Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 2, 4-5, (2001)
- [16] Anne Morgan Spalter, Philip Andrew Stone, Barbara J. Meier, Timothy S. Miller and Rosemary Michelle Simpson: Interaction in an IVR Museum of Color: Constructivism Meets Virtual Reality, Leonardo, Vol. 35, No. 1, 87-90, (2002)
- [17] Steve Benford, Gail Reynard, Chris Greenhalgh, Dave Snowdon, and Adrian Bullock: A Poetry Performance in a Collaborative Virtual Environment, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 3, 66-75, (2000)
- [18] Tien-Tsin Wong, Pheng-Ann Heng and Chi-Wing Fu: Interactive Relighting of Panoramas, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 2, 32-41, (2001)
- [19] Sheng-Fen Chien: Supporting Information Navigation in Generative Design Systems, PHD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, (1998)
- [20] Martin R. Stytz, Sheila B. Banks, Troy D. Johnson, John M. Lewis, and Scott A. Rothermel: The Virtual SpacePlane, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 21, No. 2, 42-52, (2001)
- [21] F.Kenton Musgrave: Towards a Synthetic Universe, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, No. 6, 4-5, (1999)
- [22] Eliot Feibush, Nikhil Gagvani, and Daniel Williams: Visualization for Situational Awareness, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 20, No. 5, 38-45, (2000)