

Chapter 01 - 동명대학교 게임공학과 3D 그래픽스 프로그래밍

컴퓨터 그래픽스 소개



“천문학이 망원경에 대한 것이 아닌 것처럼 전산학은 더이상 컴퓨터에 대한 것이 아니다.”
“Computer science is no more about computers than astronomy is about telescopes.”

– 에츠히르 다익스트라 Edsger W. Dijkstra

이 장에서 생각할 문제

- ❖ 컴퓨터 그래픽스에 대한 기본적인 이해
- ❖ 컴퓨터 그래픽스의 응용 분야 이해
- ❖ 컴퓨터 그래픽스의 역사

1.1 이 책이 다루는 내용

이 책은 OpenGL을 이용하여 3차원 그래픽스의 기본 개념과 이론을 이해하고 이를 구현하는 방법을 습득하는 데에 도움을 주기 위해 쓰여졌다. 컴퓨터 그래픽스는 영화와 게임 등 현재의 콘텐츠 산업의 핵심적인 기반 기술이다. 영화와 같은 상호작용성이 존재하지 않는 콘텐츠는 영상을 생성하기 위해 사용할 수 있는 계산 시간^{computing time}의 제한이 거의 없는 반면, 게임과 같이 상호작용성이 중요한 콘텐츠는 사용자에게 실시간으로 영상을 제공해야 한다는 점이 다르다. 이 책은 컴퓨터 그래픽스 중에서도 이런 게임과 같은 실시간 콘텐츠를 생성하는 데에 사용되는 그래픽스 기술을 중심으로 다룰 것이다. 이를 위해 다음과 같은 내용들이 주요 주제로 나타나게 될 것이다.

- 그래픽스 소개 – 컴퓨터 그래픽스에 대한 소개
- 프로그래밍 환경 및 OpenGL 소개 – OpenGL에 대한 소개와 구현 환경
- 변환 – 변환의 개념과 OpenGL에서의 구현 방법 이해
- 카메라 – 합성 카메라 모델의 이해와 적용
- 조명과 재질 – 렌더링을 위한 조명과 재질 모델의 이해와 구현
- 텍스처^{texture} – 기하적 복잡도를 높이지 않고 렌더링 품질을 향상하는 방법의 이해
- 블렌딩^{blending} – 프래그먼트^{fragment}에 대한 이해와 색상 혼합을 통한 다양한 표현 구현
- 셰이더^{shader} – 프로그램 가능한 파이프라인에 대한 이해와 활용

1.2 컴퓨터 그래픽스란 무엇인가

컴퓨터 그래픽스는 컴퓨터를 이용한 그래픽스이다. 그래픽스의 어원은 그리기와 쓰기를 의미하는 그리스어 **그라페** – $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon$ 인데, 이것은 어떠한 표면에 시각적인 표현을 드리내는 것을 의미한다. 따라서 컴퓨터 그래픽스는 컴퓨터를 이용하여 이러한 시각적 정보를 생산하는 것과 관련된 지식과 기술을 포괄적으로 의미한다.

시각적 관찰의 대상이 되는 정보는 영상으로 표현된다. 따라서 컴퓨터를 이용한 영상 생성이 컴퓨터 그래픽스의 최종 목표라고 할 수 있다. 이러한 컴퓨터 그래픽스에 대한 정의^{definition}는 사용되는 분야에 따라 다양하게 이루어지고 있다. 몇 가지 예를 들어보면 다음과 같은 정의들이 존재한다.

- 컴퓨터를 이용한 영상 데이터의 표현과 조작
- 영상을 생성하고 조작하기 위한 다양한 기술
- 시각 콘텐츠를 디지털 기술로 합성하거나 조작하는 방법을 연구하는 전산학 분야

그래픽스^{graphics}에는 학문으로서의 의미를 가지는 접미사 ‘ics’가 붙어 있다. 이것은 그래픽스라는 것이 결과로 나타나는 시각 정보만을 의미하는 것이 아니라는 것을 보여준다. 그래픽스는 시각정보를 생성하기 위해 필요한 다양한 이론과 기술을 다루는 학문을 의미하며, 컴퓨터 그래픽스는 컴퓨터를 도구로 이용하고, 프로그래밍을 통해 구현되는 컴퓨팅 기술을 활용하여, 시각 정보가 생성될 수 있도록 하는 학문 분야를 의미하는 것이다.

3차원 컴퓨터 그래픽스는 3차원 **기하^{geometry}** **객체** 표현을 사용하는 컴퓨터 그래픽스 분야라고 할 수 있다. 컴퓨터 게임이나 영화의 경우 최종 결과로 나타나는 영상은 2차원 공간인 모니터나 스크린에 표현되지만, 이러한 결과물을 얻기 위해 처리되는 데이터는 3차원 공간에서 정의되고 조작되므로 3차원 그래픽스라 부른다.

1.3 컴퓨터 그래픽스의 세부 분야

3차원 컴퓨터 그래픽스의 세부 분야에는 **모델링^{modeling}**, **애니메이션^{animation}**, **렌더링^{rendering}**이 있다. 이 절에서는 이 각각의 분야들이 다루는 주제를 살펴보자.

1.3.1 모델링

모델링^{modeling}은 영상 생성에 사용되는 객체의 기하적 특성을 정의하는 방법과 관련된 기술과 지식을 다룬다. 기하적 특성이라는 것은 객체의 위치를 정의하는 **좌표^{coordinate}**, 객체의 자세^{pose}를 정의하는 **회전^{rotation}** 상태 등이 대표적인 정보가 된다. 모델링 분야에서 다루는 대표적인 일들은 객체를 생성하기 위해 사용되는 **정점^{vertex}**의 개수를 결정하고, 정점들의 위치^{position}와 연결성^{connectivity}을 설정하는 일 등이다. 이때 위치는 좌표^{coordinate}로 표현되며, 연결성은 정점들로 만들어지는 **그래프^{graph}**의 **간선^{edge}**으로 표현된다. 그리고 만들어진 기하 객체에서 그려질 면^{face}을 구성하는 일 등도 모델링의 영역이 된다.

1.3.2 애니메이션

애니메이션 animation은 모델링 과정을 통해 결정된 기하 객체에 대해 시간에 따른 변화를 일으키는 작업과 이러한 작업에 관련된 기술과 지식을 의미한다. 일반적으로 변화의 대상은 기하 객체의 위치와 방향인데, 정점 각각의 위치를 변경하면 객체의 모양이 변형되는 결과를 얻을 것이다. 하나의 객체 내에서 정점 각각의 상대적 위치를 유지하면서 움직이면 이동 translation 혹은 회전 rotation과 같은 동작이 가능하다. 애니메이션의 대상의 위치뿐만 아니라 면이나 정점의 색상, 텍스처 texture의 좌표 등도 모두 가능하다.

1.4.3 렌더링

렌더링 rendering 영역에서는 모델링된 기하 객체를 모니터 등의 최종 관찰 표면에 그려내어 영상을 생성하는 분야의 작업과 관련된 기술과 지식을 다룬다. 이를 위해서는 기본적으로 다음과 같은 과정이 필요하다.

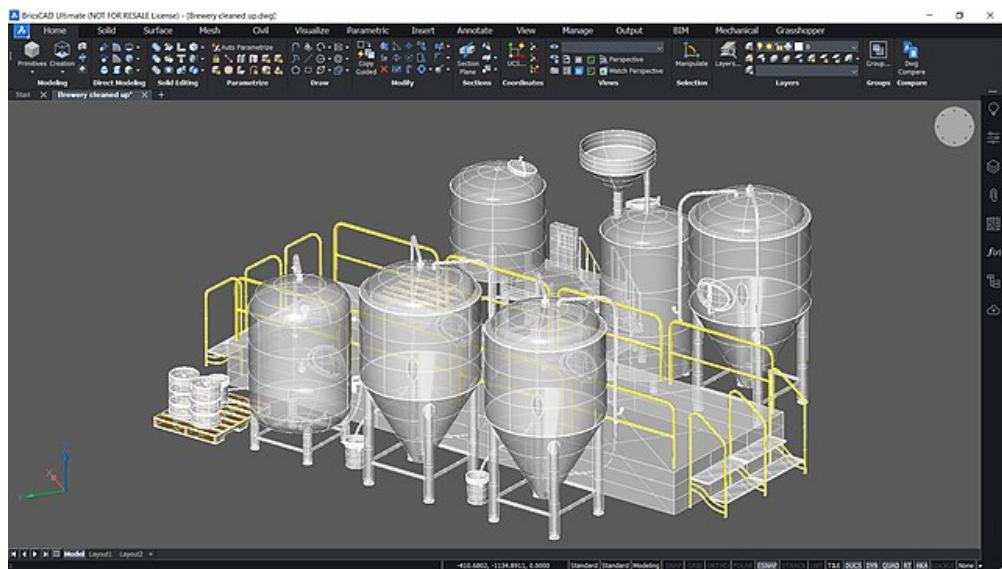
- 3차원 공간에 존재하는 기하 객체를 2차원 관찰 표면으로 투영 projection
- 조명 lighting 모델과 재질 material의 반사 모델을 이용하여 시각적으로 관찰되는 색상 및 밝기 계산

1.4 컴퓨터 그래픽스의 응용 분야

이 절에서는 컴퓨터 그래픽스가 어떠한 곳에 응용되는지 살펴보도록 하자. 컴퓨터 그래픽스는 게임이나 영화를 포함하여 다양한 영역에서 사용된다. 게임이나 영화는 컴퓨터 그래픽스가 엔터테인먼트를 위해 사용되는 대표적인 영역이며, 이 영역 이외에도 다양한 곳에 컴퓨터 그래픽스가 활용되고 있다. 예를 들면 과학기술 분야와 설계와 제조 등이 있으며, 그밖의 여러 영역에서 다양한 목적으로 활용되고 있다.

컴퓨터를 활용한 설계, 즉 캐드 CAD, computer-aided design 분야도 컴퓨터 그래픽스가 실용적으로 사용되고 있는 대표적인 영역이다. 건축이나 제조 분야의 다양한 영역에서 설계 작업에

컴퓨터 그래픽스 기술이 적용된 캐드 도구를 사용하고 있으며, 현재는 단순한 설계를 넘어 제조 단계와 연결되는 컴퓨터 기반 제조 computer-aided manufacturing 기술로 발전하였다. 캐드 기술은 설계에 필요한 인력과 시간, 그리고 각종 자원을 대폭 줄일 수 있게 하였고 업무 효율과 생산성도 높일 수 있었다. 그림 1은 캐드 프로그램의 예를 보여주고 있다.



[그림 1] bricsCAD 사용자 인터페이스¹

가상현실이라는 용어에서 가상 virtual 은 한자어로는 사실이 아닌 가짜라는 의미가 강하지만, 대응하는 영어단어 ‘virtual’은 그 의미를 정확히 번역한다면 ‘사실상 다름이 없는’이라는 의미이다. 따라서 가상현실이라는 것은 가짜 현실이라는 의미보다는 인공적으로 만들어진 현실이지만 실제 현실과 구분하기 힘든 것라는 의미가 강하다.

따라서 가상현실 분야는 현실과의 차이를 최소화하고 몰입감을 극대화하는 기술을 개발하기 위해 노력하였다. 그 대표적인 기술은 현실을 그대로 재현하는 높은 수준의 객체를 생성하는 모델링, 실제 물체와 구별하기 힘들 정도의 사실성을 가진 렌더링 기술, 그리고 자연스러운 동작을 구현하는 고급 애니메이션 기술들이 필요하다. 이것은 컴퓨터 그래픽스의 세 가지 세부 분야로 가상현실 기술은 컴퓨터 그래픽스의 기술이 그대로 적용되는 대표적인 응용분야라 할 수 있을 것이다.

¹ User id 5544332, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

다음 그림은 나사의 기술자가 우리 은하 인근 400만여 개 항성의 속도와 방향의 움직임을 재생하는 3차원 시뮬레이션을 조작하는 중이다. 여러 학자들이 이 시뮬레이션을 사용하여 별의 움직임에 대한 새로운 관점을 얻을 수 있었고 이를 이용하여 항성을 분류하는 일에 도움을 받았다고 한다.²



[그림 2] 가상현실 속에서 우주를 탐사하는 기술자³

가상현실에 적용되는 기술은 매우 다양한데, 입체 화면, 3차원 입체 음향, 데이터 장갑 등의 입출력 장치와 함께 다양한 컴퓨터 그래픽스 기술이 사용자의 몰입감을 증대시키는 데에 사용된다. **실재감**^{presence}를 제공하기 위해 인지과학, 전자공학, 기계공학 등의 다양한 분야 연구들이 함께 적용되기도 한다.

컴퓨터 그래픽스 기술은 현재 매우 발전하여 생성한 결과를 실세계에 존재하는 물체와 구별하기 힘든 수준으로 만들 수도 있다. 이러한 실사 수준의 고품질 가시화 기술은 다양한 산업 분야에 응용할 수 있다. 고품질의 결과를 얻기 위해서는 당연히 많은 양의 계산이 요구된다. 따라서 게임이나 가상현실처럼 실시간 처리가 요구되는 분야에서는 실사 수준의 고품질 가시화 기법을 채용하지 않는 경우가 많았다. 그러나 하드웨어의 성능과 그래픽스 분야의 렌더링 알고리즘이 급속히 발전함에 따라 실시간 응용에서도 점점 더 고품질

² NASA, Better than Reality: NASA Scientists Tap Virtual Reality to Make a Scientific Discovery, Jan. 30. 2020.

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/scientists-tap-virtual-reality-for-discovery>

³ NASA Goddard Photo and Video, CC BY 2.0 via Wikimedia Commons

렌더링을 채용하는 경우가 늘고 있다. 이러한 기술 발전이 계속되면 실시간 응용에 적용되는 영상을 생성하는 그래픽스 기술과 영화와 같이 렌더링 품질을 중시하는 분야에서 사용되던 그래픽 기술의 경계가 점점 더 무너질 것이다. 아래 그림은 사실적인 객체 표현을 위한 렌더링 기술의 결과이다. 이러한 렌더링을 [오프라인 렌더링](#)^{offline rendering}이라고 하고, 게임과 같은 분야에서 사용되는 렌더링 기술은 [실시간 렌더링](#)^{real-time rendering}이라고 한다. 오프라인 렌더링은 그림 3과 같이 높은 품질의 영상을 생성할 수 있지만, 실시간 렌더링은 사용할 수 있는 자원의 한계로 이러한 고품질 영상을 생성하기 어렵다. 따라서 게임과 같은 콘텐츠의 영상 품질이 일반적으로 영화와 애니메이션과 같은 콘텐츠의 영상 품질에 비해 낮다.



[그림 3] 사실적인 객체 표현을 위한 오프라인 렌더링을 적용한 결과⁴

컴퓨터 그래픽스는 예술적 창작물을 만드는 분야에도 다양하게 활용되고 있다. 컴퓨터를 이용한 시각 예술품을 만들 때에는 컴퓨터가 가진 계산 능력을 활용하여 다양한 표현을 창조해 낼 수 있으며, 이러한 표현을 시각적 결과로 만들어 낼 때 다양한 컴퓨터 그래픽스 기술이 응용될 수 있다. 최근에는 인공지능 기술의 발전으로 인공지능이 예술 작품을 창조하기도 한다. 얼마전 게임 설계자인 제이슨 앤런^{Jason Allen}은 콜로라도 주에서 개최한 미술 대회에서 인공지능을 이용하여 생성한 작품을 출품하고 1위로 수상하는 일이 벌어져 논란이 되기도 하였다. 이 작품은 전통적인 컴퓨터 그래픽스 기술이 이용된 것은 아니지만, 컴퓨터가 그래픽스 기술을 활용하여 예술품을 만드는 일을 돋는 수준을 넘어 인간의

⁴ Gilles Tran, Public domain, via Wikimedia Commons

창의성이 지배하는 영역까지 넘보는 상황이 되었음을 보여주고 있다. 그림 4는 미국의 미술 대회에서 1등을 차지한 작품으로 인공지능이 생성한 이미지이다.



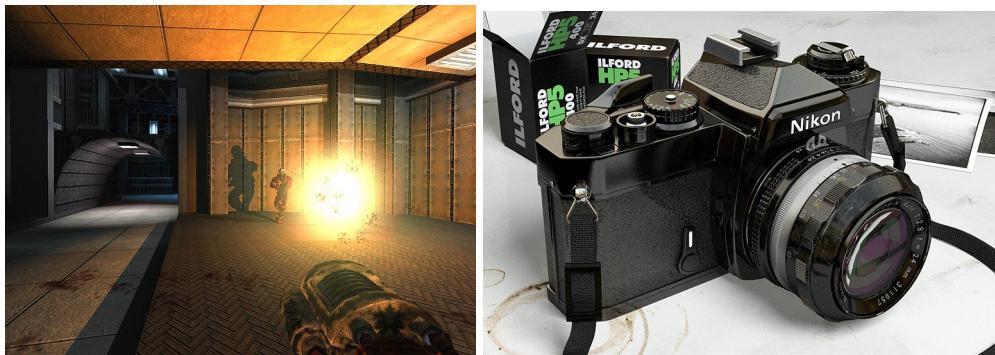
[그림 4] 미술대회에서 1위를 차지한 인공지능이 그린 그림⁵

컴퓨터 그래픽스가 상업적으로 가장 많이 응용되는 분야는 컴퓨터 애니메이션과 영화일 것이다. 영화는 그 특성상 **상호작용성**^{interactivity}이 요구되지 않는다. 따라서 오랜 시간 동안 렌더링 작업을 수행하여 높은 수준의 영상을 생성하는 것이 허용된다. 또한 한 번 렌더링된 것을 게임처럼 한 사람만 사용하는 것이 아니라 여러 사람이 함께 전세계에서 공유하여 활용하기 때문에 렌더링 과정에서 수많은 예산 자원을 동시에 사용하여 하나의 작품을 만드는 것이 허용된다. 이렇게 많은 예산 자원을 활용하여 상당한 시간을 들여 고품질의 렌더링 결과를 만들어 내는 것을 오프라인 렌더링이라 부른다는 것을 앞서 설명하였다. 영화와 애니메이션은 대표적인 오프라인 렌더링 응용 분야이다.

게임은 영화나 애니메이션처럼 컴퓨터 그래픽스가 상업적으로 사용된 대표적인 분야라고 할 수 있다. 그런데 영화나 애니메이션과 다른 점은 상호작용성이 매우 중요하다는 것이다. 게임을 하고 있는 사용자에게는 즉각적인 시각 정보가 제공되어야 하고 이를 위해서는 초당 수십 **프레임**^{frame}의 장면이 실시간에 생성되어 제공되어야 한다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 개발된 하드웨어가 **그래픽 처리 장치**^{graphics processing unit, GPU}, 즉 GPU이다. 이 GPU를 이용하여 고속으로 렌더링 결과를 생성하고 사용자가 끊김 없는 게임 혹은 가상현실

⁵ Jason Allen, Théâtre D'opéra Spatial, Twiter/ @rgshanbhag

콘텐츠를 사용할 수 있도록 하는 것이 실시간 렌더링 기술의 목표이다. 아래 그림을 통해 실시간 렌더링과 오프라인 렌더링의 차이를 확인할 수 있다.



[그림 5] 실시간 렌더링을 구현된 게임(좌)와 오프라인 렌더링으로 그려진 사실적 이미지(우)

오프라인 렌더링을 위해서는 하나의 컴퓨터가 아니라 여러 대의 컴퓨터가 병렬적으로 계산을 하고 결과를 내어놓게 하는데, 이를 [レン더 ファーム](#)^{render farm}이라고 부른다. 그림 6의 왼쪽은 동명대학교가 2007년 렌더링 작업의 고속화 등을 지원하기 위해 도입한 슈퍼컴퓨터 2호기이다. 이것은 IBM사의 블레이드 서버로 60개 노드를 연결한 [クラスタ](#)^{cluster} 컴퓨터이다. 이러한 장비는 오프라인 렌더링에는 적합하지만, 하나의 사용자를 위해 게임이나 가상현실 콘텐츠의 그래픽 결과를 생산하는 데에 사용하는 것은 부적절하다.



[그림 6] 동명대의 렌더링 고속화용 CPU 기반 슈퍼컴 2호기(2007)와 GPU 기반 3호기(2015)

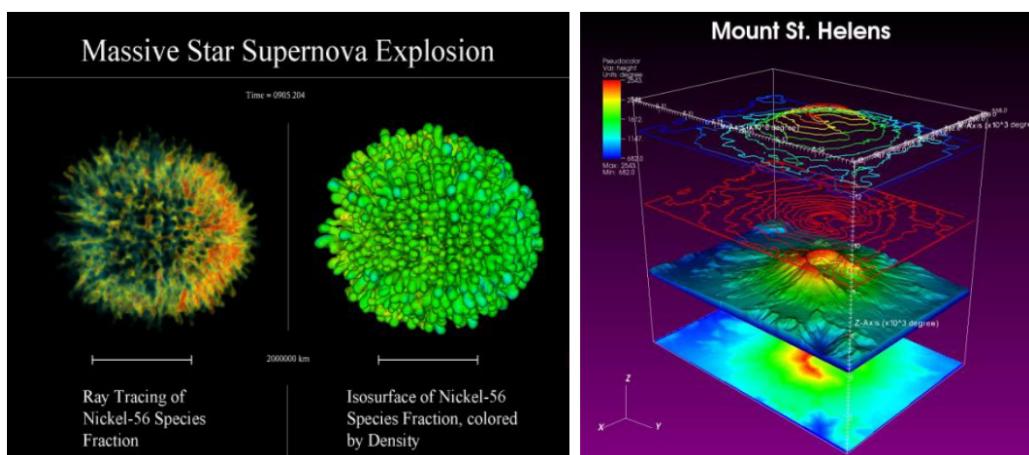
이러한 이유로 실시간 렌더링은 전혀 다른 하드웨어 제약조건을 가정하여 기술이 발전하였다. 실시간 렌더링을 위해서 개발된 장치가 GPU인데, GPU는 매우 많은 수의 [コア](#)^{core}를 갖는 병렬 처리기이다. 코어란 독립적으로 작업을 수행할 수 있는 처리 장치를

의미한다. 게임 등의 발전에 따라 GPU의 성능도 급격히 발전하게 되었는데, 실시간 렌더링 뿐만 아니라 CPU를 대체하는 병용 병렬 처리 장치로 활발히 활용되고 있다. 이에 따라 슈퍼컴퓨터를 구현하는 핵심 요소로 GPU가 사용되고 있으며, 기존의 CPU 기반 렌더팜도 GPU를 이용하여 구현되고 오프라인 렌더링에도 GPU가 적극적으로 활용되고 있다. 그림 6의 오른쪽은 렌더링과 다양한 계산에 활용하기 위하여 2015년 GPU 기반의 슈퍼컴퓨터를 도입하여 기존의 슈퍼컴퓨터를 대체하는 행사의 장면이다.

컴퓨터 그래픽스의 발전으로 사용자가 몰입할 수 있는 사실적인 환경을 가상의 공간에 재현해 내는 것이 가능해지고 있다. 이러한 강력한 가시화 기능은 교육과 훈련 분야에 매우 효과적이다. 실제 환경에서 훈련하기 힘든 전투나, 항공기 조종 등의 훈련을 가상 공간에서 진행할 수 있다. 특히 위험하고 비용이 많이 드는 군사 분야에서 높은 활용도를 가지고 있다. 그림 7은 이러한 훈련 장비에 적용된 컴퓨터 그래픽스 기술의 예시이다.



[그림 7] 군사 훈련에 사용되는 컴퓨터 그래픽스 기술



[그림 8] 과학기술 분야 정보 가시화에 사용되는 컴퓨터 그래픽스 기술

컴퓨터는 과학 분야에서 오랫동안 활용된 도구이다. 따라서 과학 기술 분야에서 요구되는 데이터 분석에 매우 적합하다. 여기에 컴퓨터 그래픽스 기술이 결합하면 과학기술 분야에서 획득된 데이터를 이해하기 쉬운 형태로 표현할 수 있고, 분석된 내용 역시 효과적으로 전달할 수 있다. 현상을 직관적으로 이해할 수 있도록 도와 학자들이 데이터와 분석 결과에서 유의미한 패턴이나 추세를 파악하는 일을 쉽게 할 수 있도록 할 수 있다. 그림 8은 과학기술 분야의 정보 가시화를 위해 컴퓨터 그래픽스 기술이 사용된 예를 보여주고 있다.

1.5 컴퓨터 그래픽스의 역사 - 실시간 컴퓨터 그래픽스 중심으로

컴퓨터 그래픽스는 컴퓨터 역사의 초기부터 나타났다. 우리는 정보를 다양한 방식으로 인지하는데, 대상을 이해하는 데에 가장 중요한 정보는 시각적 정보이다. 따라서 컴퓨터 역사의 가장 초기라고 할 수 있는 1950년대부터 컴퓨터가 생성한 정보를 시각적으로 출력하기 위한 노력을 하였고, 이것이 바로 컴퓨터 그래픽스의 역사의 시작이라고 할 수 있다.

초창기의 가시화 장치는 지금처럼 **픽셀**^{pixel} 단위로 빛을 제어할 수 있는 **래스터**^{raster} **디스플레이**가 아니라 **벡터**^{vector} **디스플레이** 장치를 이용하였다. 벡터 디스플레이에는 전자총^{electron gun}이 전자를 방출하여 화면에 빛이 나도록 하는데, 전자총의 움직임에 따라 선이 그려지는 장치이다. 현재와 같이 **비트맵**^{bitmap} 형식으로 화면 출력을 하는 것이 아니기 때문에 면을 그리는 일은 매우 어렵다. 이런 장치를 컴퓨터 제어 **오실로스코프**^{oscilloscope}라고 부른다. 오실로스코프는 전류 변화를 화면으로 보여주는 장치를 의미한다.

오실로스코프를 이용한 정보 가시화는 초창기 컴퓨팅 환경에서 다양하게 활용되었는데, 이를 사람이 제어하고 게임에 응용할 수 있도록 만든 사람이 브룩헤이븐 국립 연구소의 물리학자였던 윌리엄 히긴보텀이다. 그는 연구소를 방문하는 사람들에게 재미있는 볼거리를 제공하기 위해 연구소의 컴퓨터를 이용하여 두 사람이 공을 주고 받는 테니스와 유사한 게임을 구현하여 ‘**2인용 테니스**^{Tennis for Two*}’라는 이름으로 그림 9와 같이 전시하였다. 이 게임은 컴퓨터 게임의 역사에서 최초로 만들어진 게임으로 여겨진다.



[그림 9] 2인용 테니스 Tennis for Two라는 이름으로 만들어진 최초의 게임

컴퓨터 그래픽스라는 용어를 처음으로 사용한 사람은 윌리엄 페터 William Fetter이다. 보잉Boeing사에 근무하던 디자인 분야의 전문가로 캐드 CAD 부서에서 새로운 개념의 그리기 방식을 고안하고 수학자와 프로그래머들이 이를 구현하도록 만들었다. 보잉은 1963년 컴퓨터 그래픽스 그룹을 창설하고 페터는 이 부서의 책임자가 되었다.⁶



[그림 10] 컴퓨터 그래픽스라는 용어를 처음으로 사용한 윌리엄 페터 William Fetter

⁶ Robin Oppenheimer: William Fetter, E.A.T., and 1960s Computer Graphics Collaborations in Seattle - HistoryLink.org

1960년대에까지의 컴퓨터 그래픽스는 객체를 표현하는 뼈대 구조를 표현하기 위해 정점을 연결하는 구조만 드러나는 [와이어프레임](#)^{wireframe} 가시화가 일반적이었다. 이 시기에 다양한 그래픽스 관련 기술과 산업이 출현하였고 오늘날 가상현실 응용분야에서 중요한 장치가 되는 [HMD](#)^{head-mounted display}도 1966년 [서덜랜드](#)^{Ivan Sutherland}에 의해 개발되었다. 서덜랜드는 1967년에 [유타](#)^{Utah} 대학으로 옮겨 이 대학이 그래픽스 분야의 연구 중심이 되는 데에 큰 기여를 하였다. 이 유타 대학의 이름이 붙은 유명한 3차원 모델이 그림 11에 나타나 있는 [유타 주전자](#)^{Utah teapot}이다. 유타 주전자는 1975년에 유타 대학의 [마틴 뉴웰](#)^{Martin Newell}에 의해 만들어졌고, 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 가장 흔히 사용되는 모델이 되었다.⁷



[그림 11] 유타 주전자⁸

1960년대에 컴퓨터 그래픽스 분야에서 일어난 중요한 일 중에 하나는 전산학 분야의 가장 큰 학술 단체인 미국 계산기 협회, 즉 [ACM](#)^{Association for Computing Machinery}에서 특화 분과^{SIG, special interest group}로 [SIGGRAPH](#)를 설립한 것이다. 이 분과는 이후 컴퓨터 그래픽스의 발전을 이끄는 매우 중요한 학술 그룹으로 성장하며, 지금까지 지속적으로 컴퓨터 그래픽스의 기술 혁신을 이끌어 왔다.

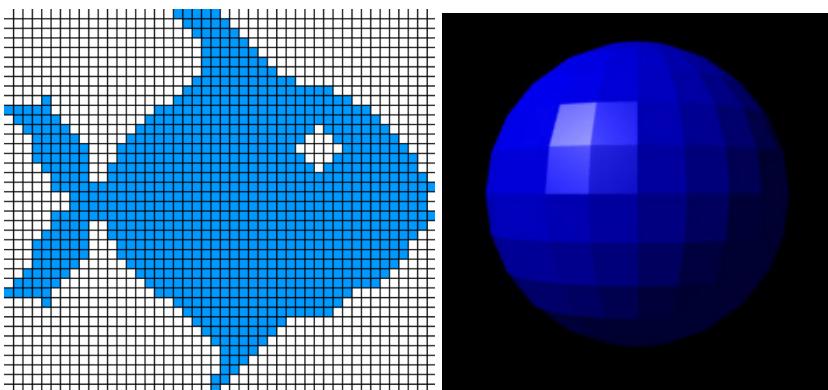
1970년대 유타 대학은 서덜랜드의 지도 아래 컴퓨터 그래픽스 분야에서 다양한 혁신을 이루었으며, 이 당시 학생으로 [캐트멀](#)^{Edwin Catmull}도 있었다. 컴퓨터 그래픽스 분야에서 다양한 공헌을 한 캐트멀은 애니메이션을 매우 좋아했고 컴퓨터가 애니메이션을 생성하는 핵심

⁷ Dunietz, Jesse (February 29, 2016). "The Most Important Object In Computer Graphics History Is This Teapot". Nautilus. Retrieved March 3, 2019.

⁸ zzubnik (Nik Clark, Norwich, UK), CC0, via Wikimedia Commons

도구가 될 것으로 예측했다. 그리고 현재 3차원 컴퓨터 그래픽스의 기반이 되는 기술로 여겨지는 텍스처 매핑(texture mapping) 기술의 개발에 선구적인 역할을 하였다.

1970년대는 래스터^{raster} 그래픽스 장치가 표준적인 디스플레이로 자리를 잡는 시기이며, 이 래스터 그래픽스 장치는 이전의 벡터 그래픽스 장치보다 면을 표현하는 일이 더욱 수월하게 만들었다. 면의 음영을 결정하거나 화소별 색상을 계산하여 사실적인 고품질 이미지 생성이 가능하게 되어 컴퓨터 그래픽스를 이용하여 생성한 영상의 품질을 고도화할 수 있었다. 그럼 12의 왼쪽은 래스터 그래픽스에서 그림을 그릴 때에 가장 기본적인 요소가 되는 화소^{pixel}의 개념을 보여주고 있다. 화소는 영상을 일정한 간격으로 나누었을 때 하나의 색상으로 표현되며 조작할 수 있는 점이다. 컴퓨터가 이 화소를 빠르게 조작할 수 있다면 그럼 12의 오른쪽과 같이 면의 색을 채워 그림을 그릴 수 있고, 입체 객체의 음영을 자연스럽게 표현할 수 있다. 그럼 12의 오른쪽과 같이 하나의 면을 하나의 색으로 칠해 표현하는 방식을 플랫 셰이딩^{flat shading}이라 부른다.



[그림 12] 래스터 그래픽스에서 사용되는 화소^{pixel}의 개념⁹과 플랫 셰이딩 결과

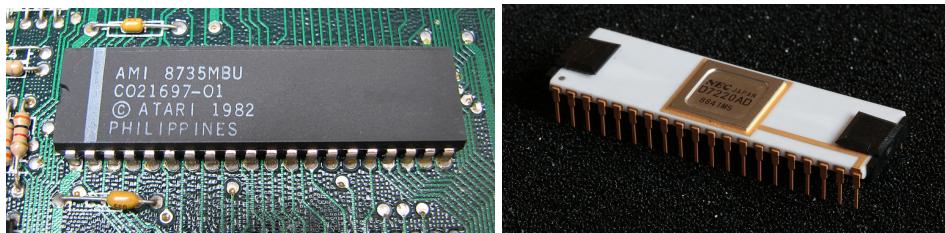
앙리 구로^{Henri Gouraud}, 짐 블린^{Jim Blinn}, 부이 뚜옹 풍^{Bui Tuong Phong} 등이 플랫 셰이딩보다 더 나은 방식으로 부드러운 곡면을 표현할 수 있는 셰이딩 기법을 제안한 시기도 이 1970년대이며, 이들은 모두 유타 대학에서 연구를 수행하였다.¹⁰

1980년대로 접어들면서 컴퓨터 그래픽스 기술은 더욱 고도화된다. 특히 개인용 컴퓨터가 보급되면서 사용자들에게 시각적 정보를 제공하기 위한 노력이 더욱 활발해졌다. 이 시기에 16비트 마이크로프로세서와 그래픽 처리 장치가 등장하면서 이러한 발전이 가능해졌다.

⁹ Andreas -horn- Hornig, de:Benutzer:Sjr, CC BY-SA 2.5 via Wikimedia Commons

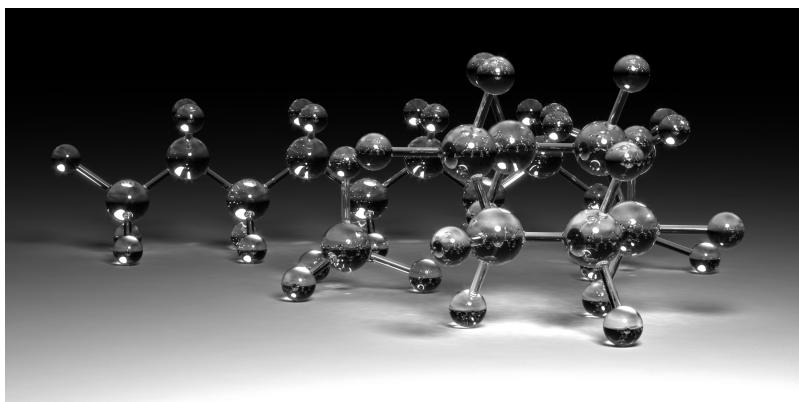
¹⁰ "University of Utah - History of the School of Computing". University of Utah. Retrieved 2022-09-23.

중앙처리장치^{CPU}를 도와 프레임 버퍼의 그래픽 정보를 처리하고 애니메이션 등을 지원하는 장치는 이미 1970년대 아케이드 게임을 위해 개발되었는데, 개인용 컴퓨터에서 구현된 최초의 GPU는 1980년대 등장한 NEC μ PD7220이다. 아케이드 게임을 위해 사용된 그래픽 처리 장치는 아타리^{Atari} 사의 ANTIC^{Alphanumeric Television Interface Controller} 칩 등이 있는데, 그 모양은 그림 13의 왼쪽과 같고, 최초의 PC용 GPU인 NEC μ PD7220의 모습은 그림 13의 오른쪽과 같다.



[그림 13] 아타리^{Atari}의 ANTIC 칩¹¹과 개인용 컴퓨터에 사용된 GPU인 NEC μ PD7220¹²

1980년대는 컴퓨터의 성능이 급속히 개선되던 시기로 광선 추적법^{ray tracing} 등을 활용할 수 있는 컴퓨팅 환경이 된다. 이 기술은 이미 1960년대에 아펠^{Arthur Appel}이 그 이론적 방법론을 제안했지만, 컴퓨팅 자원의 제약으로 실제 구현이 어려웠다. 그림 14는 광선 추적법을 이용하여 매우 사실적인 장면을 그려낸 예이다.



[그림 14] 광선 추적법을 이용한 렌더링 결과

1990년대는 GPU가 컴퓨터 그래픽스 분야를 혁명적으로 개선하는 시기가 된다. 개인용 컴퓨터가 보급이 확대되면서 컴퓨터 게임이 발전을 거듭하게 되고, 더 높은 품질의 그래픽

¹¹ Rod Castler, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

¹² Drahtlos, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons

콘텐츠를 만들어내기 위한 기술의 발전이 GPU의 급속한 발전을 이끌었다. 따라서 이 시기는 개인용 컴퓨터에 GPU가 표준적인 하드웨어로 장착되었다. 또한 이 시기에 실시간 그래픽스의 실질적 *de facto* 산업 표준이 되는 OpenGL API의 기본이 완성된다. 이러한 발전에 힘입어 개인용 컴퓨터에서도 텍스처 매핑이나 블렌딩 blending 기술이 가능해졌고, 게임과 같은 실시간 그래픽스 콘텐츠의 품질이 급격히 개선되었다.

이 시기는 컴퓨터 그래픽스 기술을 이용하여 제작된 애니메이션이 상업적 성공을 거두며 관련 산업의 발전을 촉진하기도 하였다. 컴퓨터 그래픽스를 이용하여 전체 애니메이션을 제작한 첫 번째 상업 영화인 *토이 스토리 Toy Story*가 1995년에 발표되었고, 컴퓨터 애니메이션과 영화 특수효과의 상업적 가치를 크게 높아졌다. 이 당시 컴퓨터 그래픽스의 연구와 상업적 활용에서 중요한 역할을 수행한 기업이 실리콘 그래픽스 Silicon Graphics라는 회사였는데, 이 회사가 OpenGL API를 만드는 데에 결정적 기여를 하였다. 또한 이 회사의 고성능의 그래픽 워크스테이션은 컴퓨터 그래픽스 학계와 산업계에서 매우 활발히 사용되었다. 그림 15는 이 회사의 워크스테이션 제품들이다.



[그림 15] 실리콘 그래픽스 사의 워크스테이션 O2¹³, Indigo¹⁴, Octane¹⁵ (왼쪽부터)

2000년대 이후는 극사실적 그래픽 표현 기술이 실사와 구분하기 어려운 수준에 이르게 된다. NVIDIA와 ATI는 실시간 그래픽스 분야를 지원하는 하드웨어 장비 분야에서 치열한 경쟁을 벌였고, 이는 개인용 컴퓨터의 그래픽 처리 능력을 매우 높은 수준으로 끌어 올리게 된다. GPU는 그래픽 처리에 국한된 기능을 고속으로 처리하기 위한 장치로 그 기능이 고정적으로 구현되어 있었지만, 이 시기에는 프로그램 가능한 장치로 유연성이 더욱 높아진다. 이에 따라 고급 세이딩 기술이 실시간 그래픽스 환경에서 구현될 수 있었으며, 사용자들의 고품질 콘텐츠 요구에 대응하기 위해 GPU의 처리 성능은 폭발적으로 발전하게

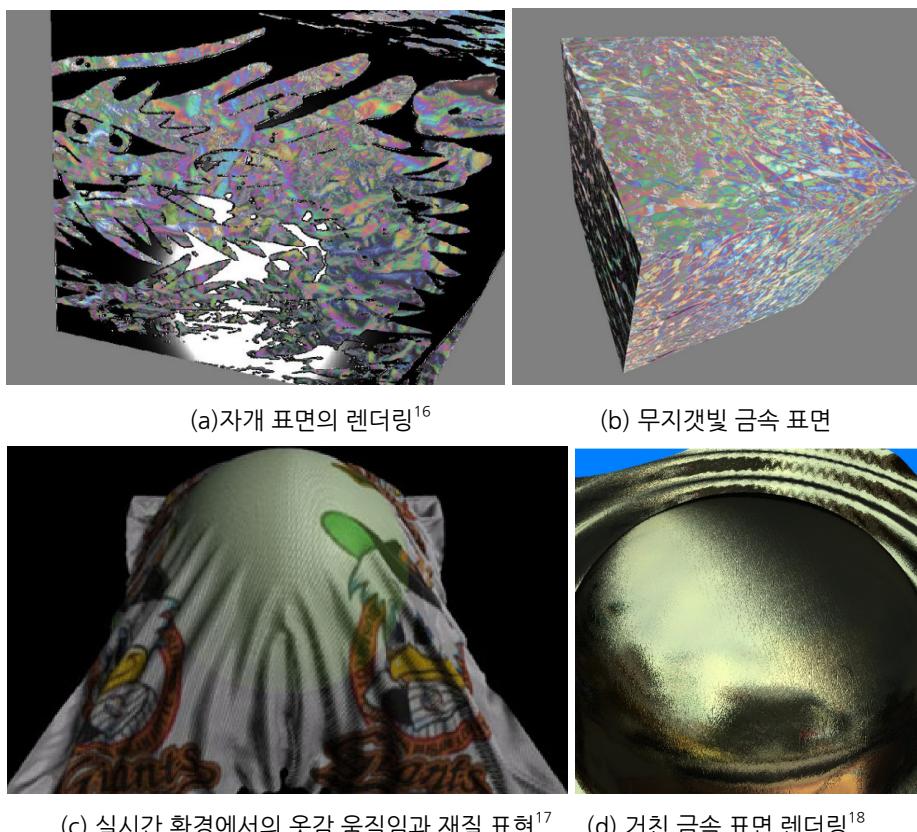
¹³ Afrank99, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

¹⁴ Retro-Computing Society of Rhode Island, CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

¹⁵ Afrank99, CC BY-SA 2.0 via Wikimedia Commons

되었다. 이러한 발전에 따라 GPU를 그래픽 처리에만 사용하지 않고 뛰어난 데이터 병렬처리 능력을 일반적인 계산 문제에도 활용하는 **병용 GPU^{GPGPU}** 시대가 오게 된다.

2010년대 이후는 콘텐츠 산업 전반에 컴퓨터 그래픽스 기술이 사용되지 않는 곳이 거의 없을 정도가 되었을 뿐만 아니라, 실사와 구분하기 힘든 수준의 렌더링 기술을 갖추게 되었고, 실시간 그래픽스에서도 실사 수준에 근접하는 표현들이 흔하게 나타나게 되었다. 텍스처 매핑을 **다중 스테이지^{multi-stage}**로 구성하는 것이 일반화되었고, **BRDF^{bidirectional reflectance distribution function}**을 이용한 사실적인 표면 렌더링이 실시간 콘텐츠에서도 구현하는 것이 어렵지 않게 되었다.



[그림 16] 다양한 텍스처와 BRDF에 기반하여 사실적 객체를 실시간에 렌더링한 예

¹⁶ Young-Min Kang, Do-Hoon Lee, Hwan-Gue Cho. Multipeak anisotropic microfacet model for iridescent surfaces, *Multimedia Tools and Applications*, 74(16):6229-6242, Springer, 2015.

¹⁷ Young-Min Kang and Chang-Sik Cho. Photorealistic Cloth in Realtime Applications, *Computer Animation and Virtual Worlds*, 14:56, 2012.

¹⁸ Young-Min Kang, Hwan-Gue Cho and Sung-Soo Kim. Plausible and Realtime Rendering of Scratched Metal by Deforming MDF of Normal Mapped Anisotropic Surface, *Journal of WSCG*, 19(3):101-110, 2011.