中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

浅谈计算机图形学的发展与机遇

刘利刚
中国科学技术大学

GAMES Webniar之回顾

- GAMES Webinar主页
  - https://games-cn.org
- 100期在线报告
  - 2017.6.22.第1期--2019.6.27.第100期
- 6个系列教程
  - SLAM, IGA, Rendering, Human Performance, Simulation, Deep Learning
- 丰富的资料储备（视频、PPT等）
- 在线观看报告总人数近3万人次

提纲

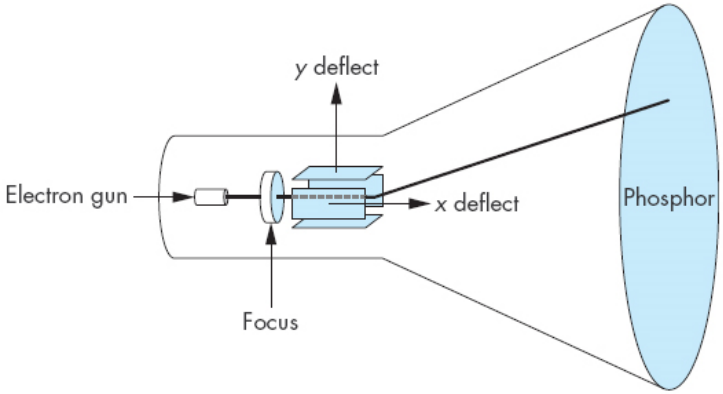
- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

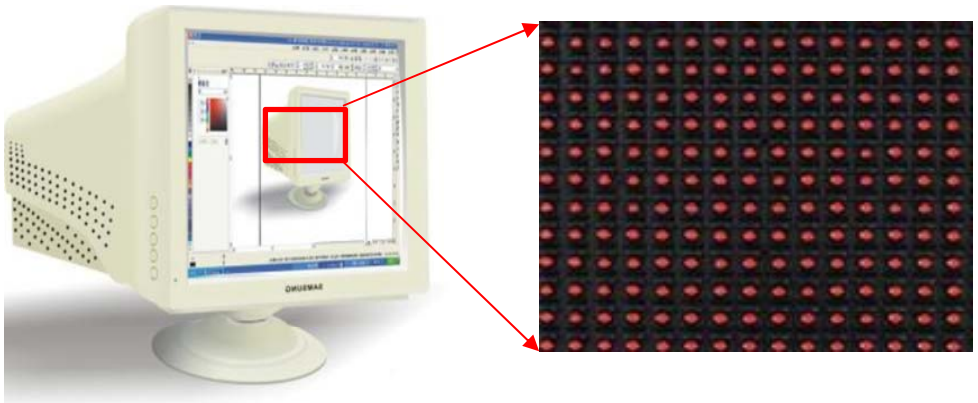
提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

图形显示器的产生

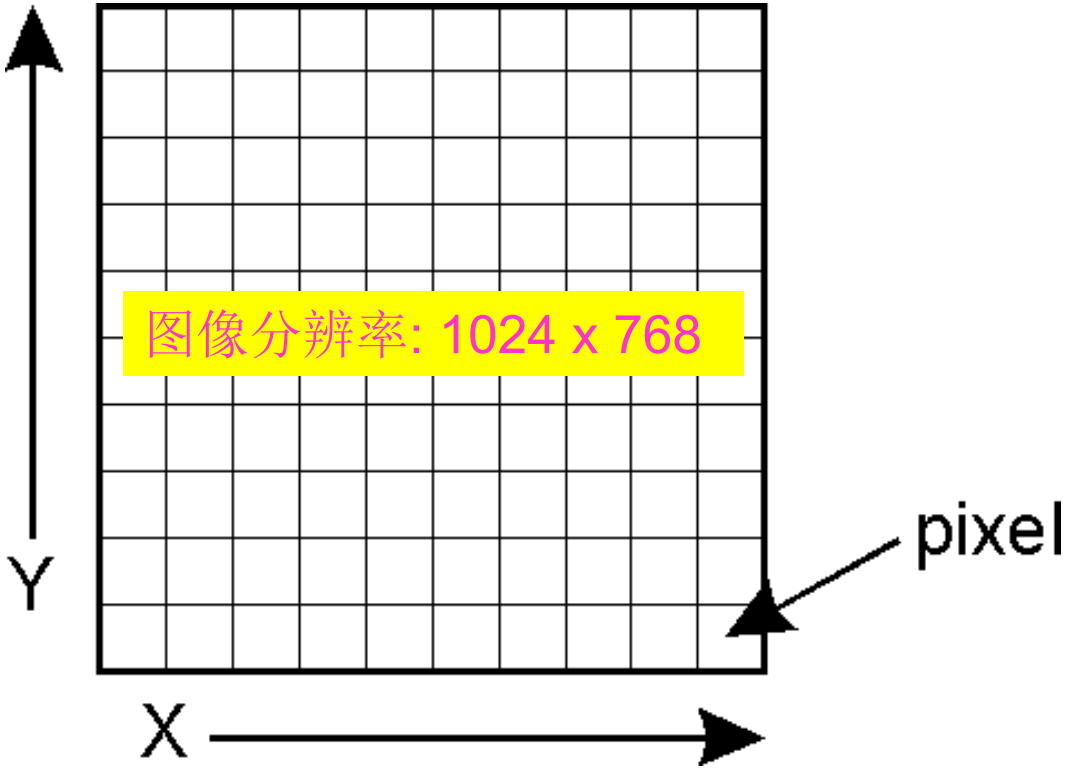
- 1946年，美国宾夕法尼亚大学，世界上第一台电子计算机问世
- 1959 年，麻省理工学院林肯实验室，第一台阴极射线显像管（CRT）显示器
  - 光栅显示器



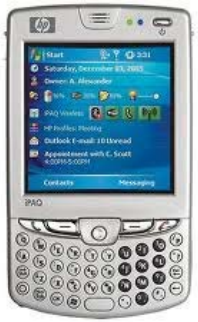


光栅显示器/数字图像的数学模型（栅格图、点阵图）

- 像素构成的矩阵：连续空间的离散采样



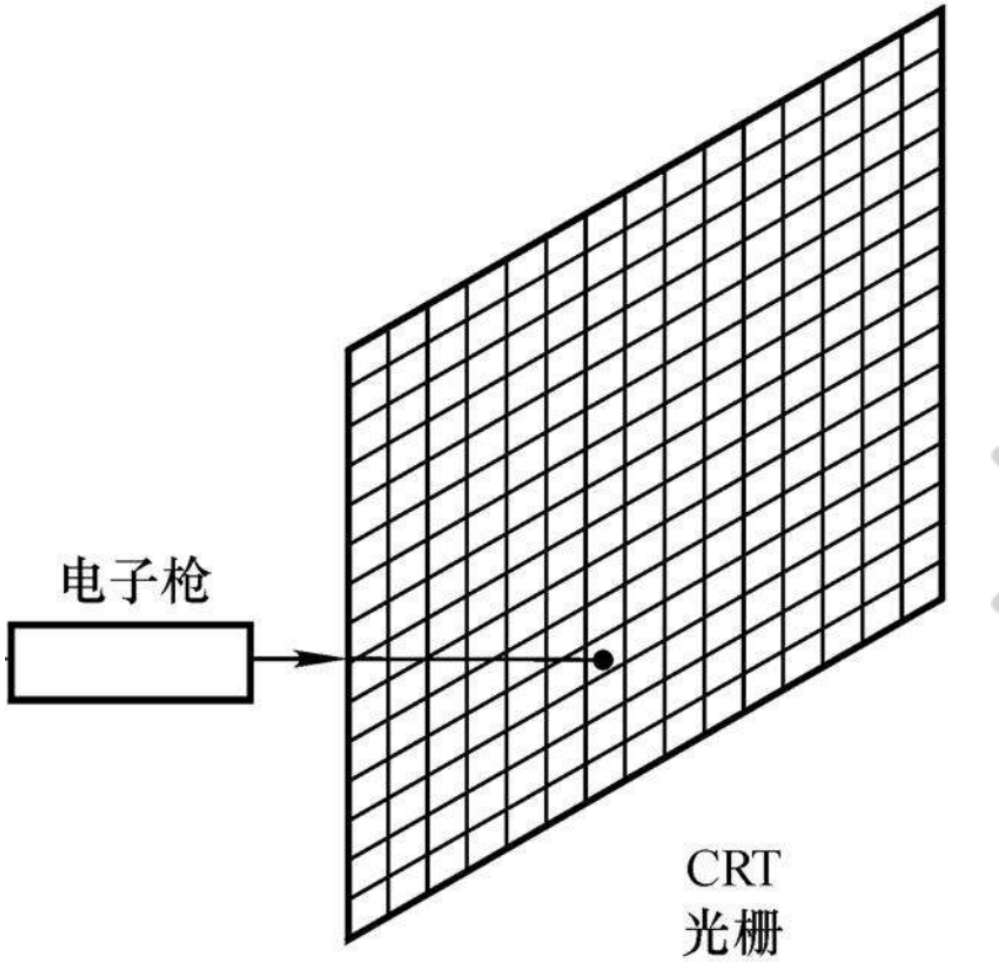
现有显示设备基本都是光栅显示器



计算机图形学的产生

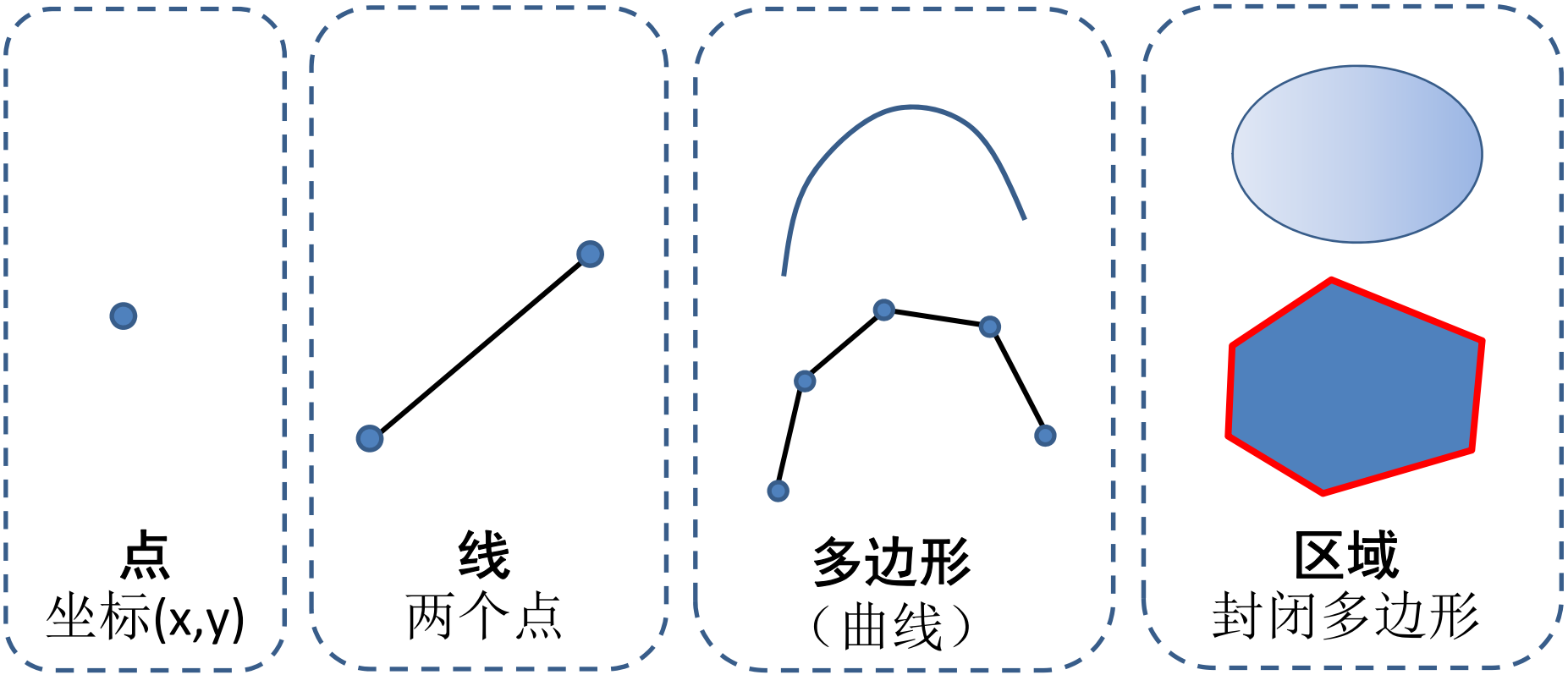
- 1962年，麻省理工学院，Ivan Sutherland博士论文“Sketchpad：一个人机交互通信的图形系统”
  - 提出“计算机图形学”的概念
  - 1988年图灵奖
  - ACM SIGGRAPH Coons奖

问题：如何在光栅显示器上显示几何图形？



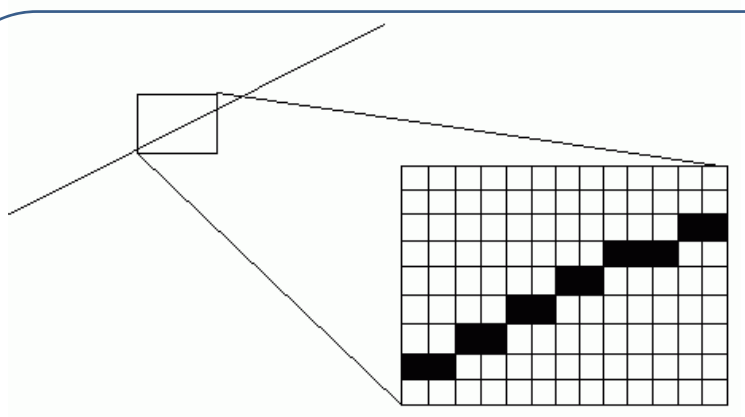
2D图形（矢量）：

利用数学表达的几何对象（点、线、面）

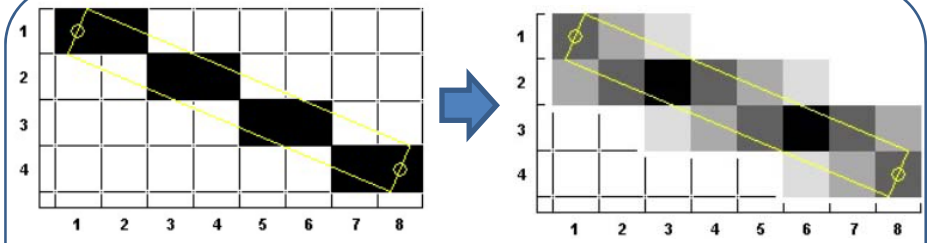


图形对象的属性：大小、线宽、类型、填充、颜色…

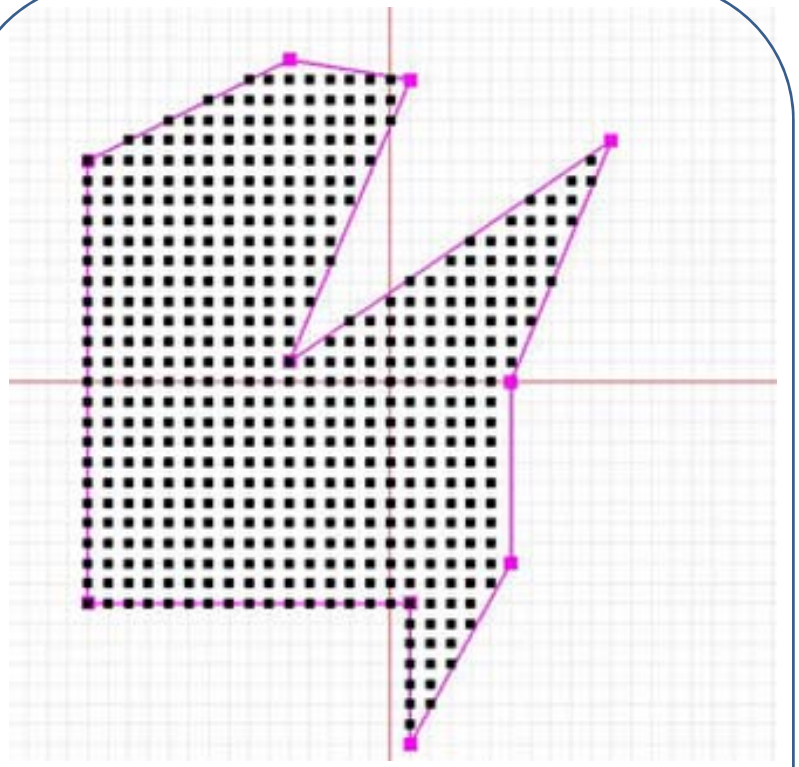
2D图形的渲染(Render)：
将几何对象转化为栅格图像（光栅化）



直线的渲染
(DDA算法, Bresenham算法...）



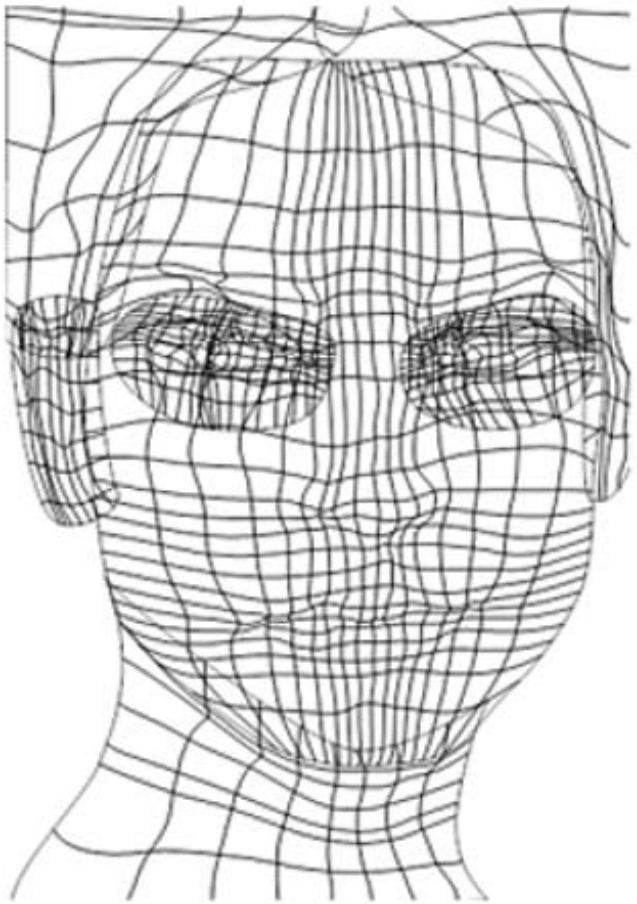
直线的反走样(Anti-Aliasing)

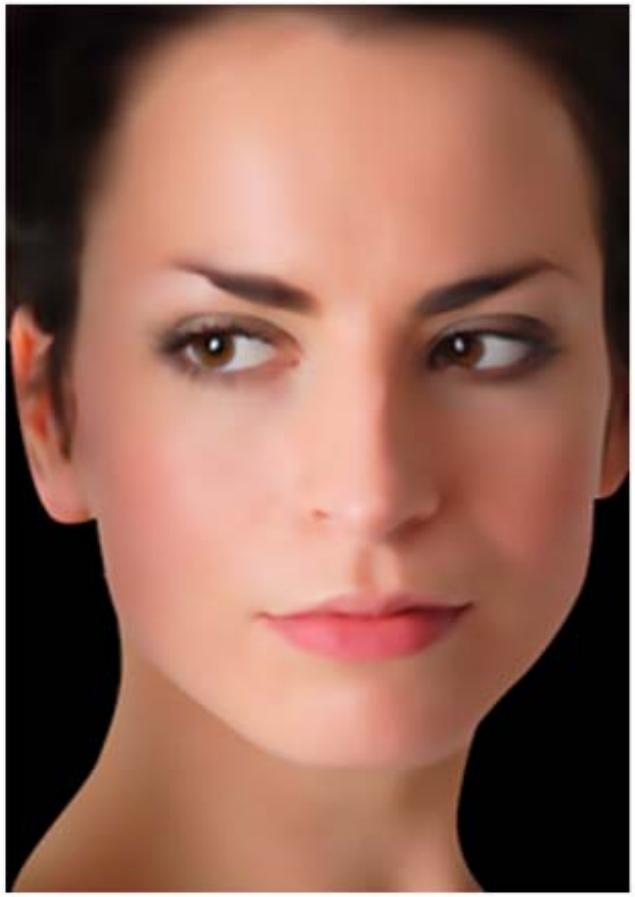


区域的渲染
(多边形的扫描转换算法）

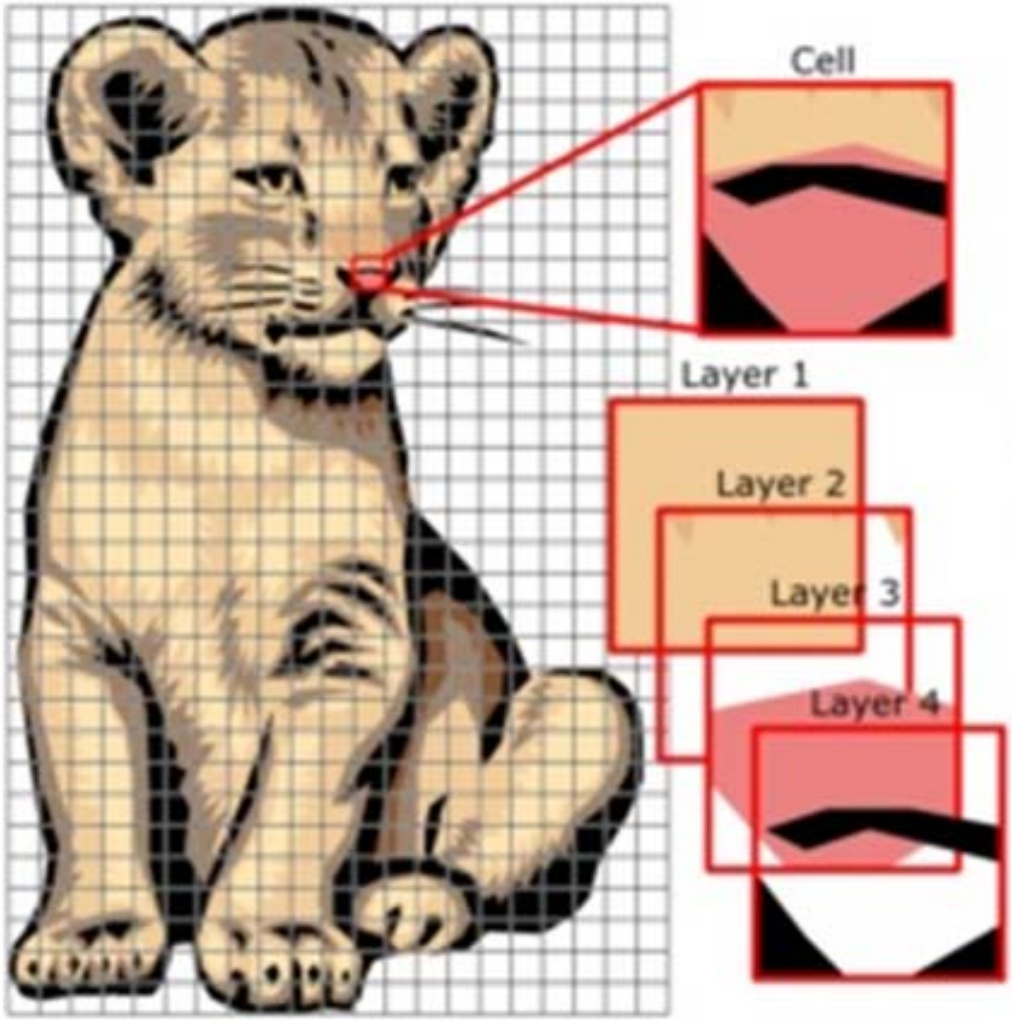
初期的计算机图形学的研究问题

复杂的2D矢量图形





多图层图形：
图层之间的混合、透明...



栅格图像与矢量图形

栅格图

矢量图

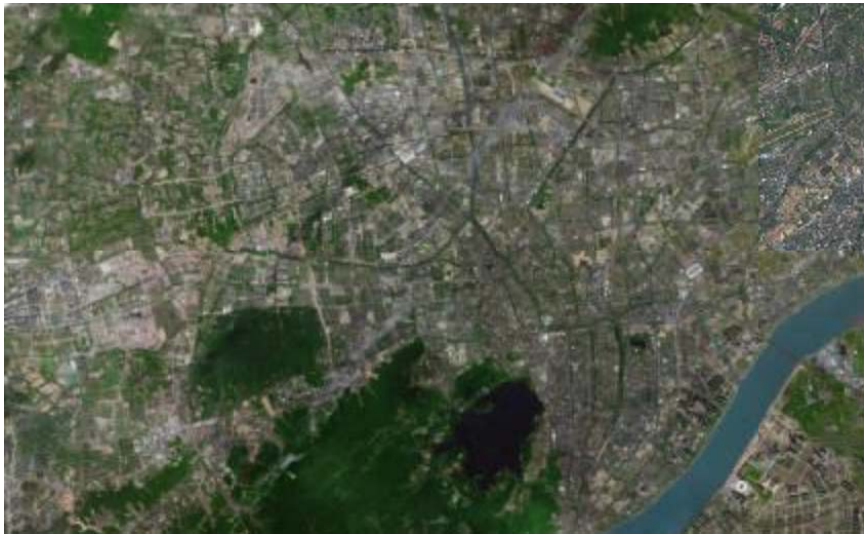
放大后的栅格图

放大后的矢量图

图像 vs 图形

	图像 (Non-scalable)	图形 (Scalable)
表达	点阵表达，无数学表达	数学表达：坐标点、直线段、曲线
存储	像素的集合：存储空间大	坐标与方程：存储空间小
绘制	直接显示像素	通过转化计算得到像素再显示
缩放	利用邻域信息来插值得到	先计算坐标，再转化为像素集
分辨率	有限	无限
语义性	无语义的	可含语义的

举个例子：地图



高空影像

矢量图形（路网、地块）

自动识别困难，
一般手工标注

影像+路网

互联网地图中的配图渲染

- 大量的矢量图形将消耗大量的计算资源
- 预先渲染成图像进行调度显示（预计算）

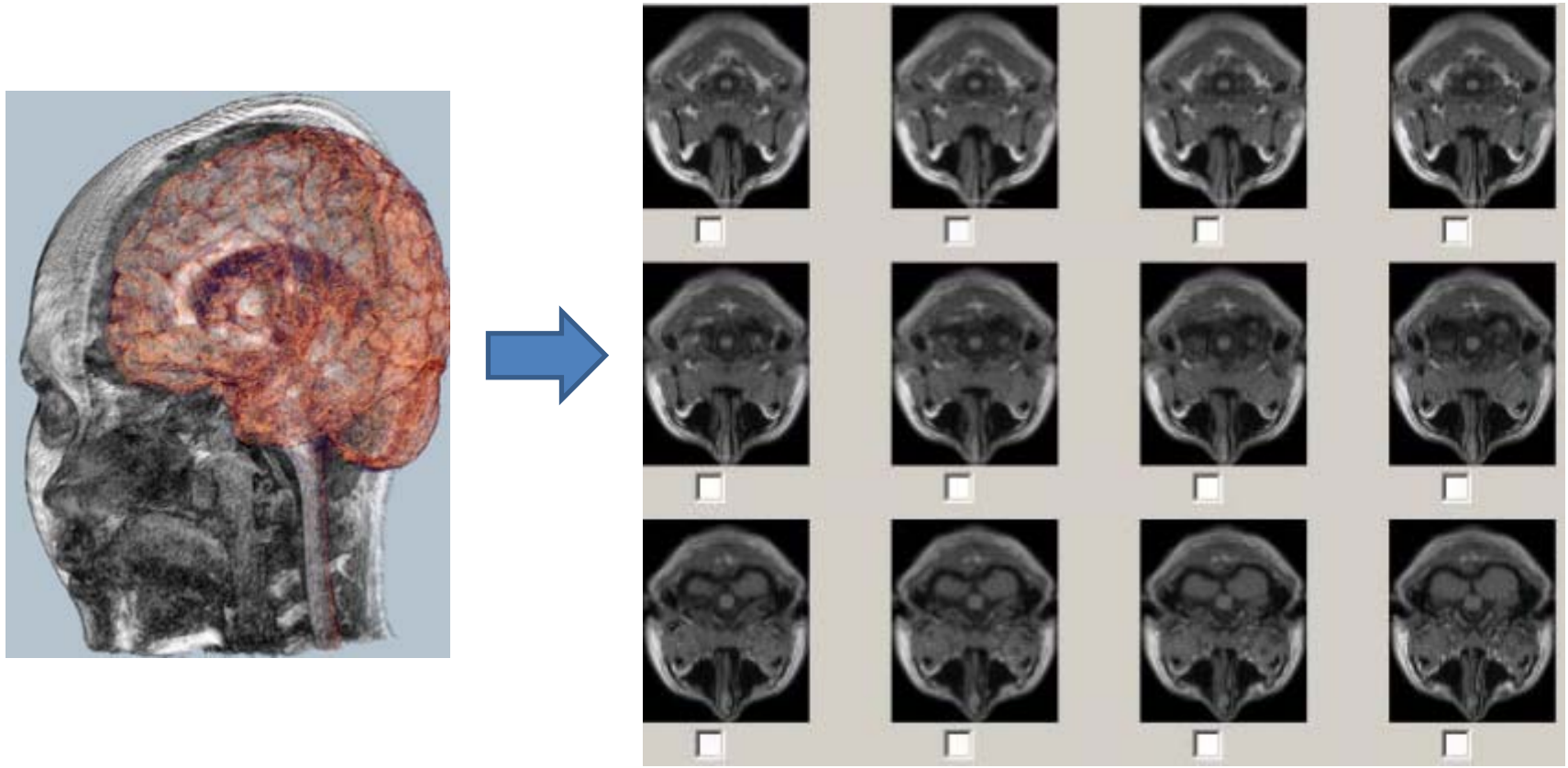
2D动态图形：图形序列

- 关键帧动画：给定关键帧，插值生成中间帧

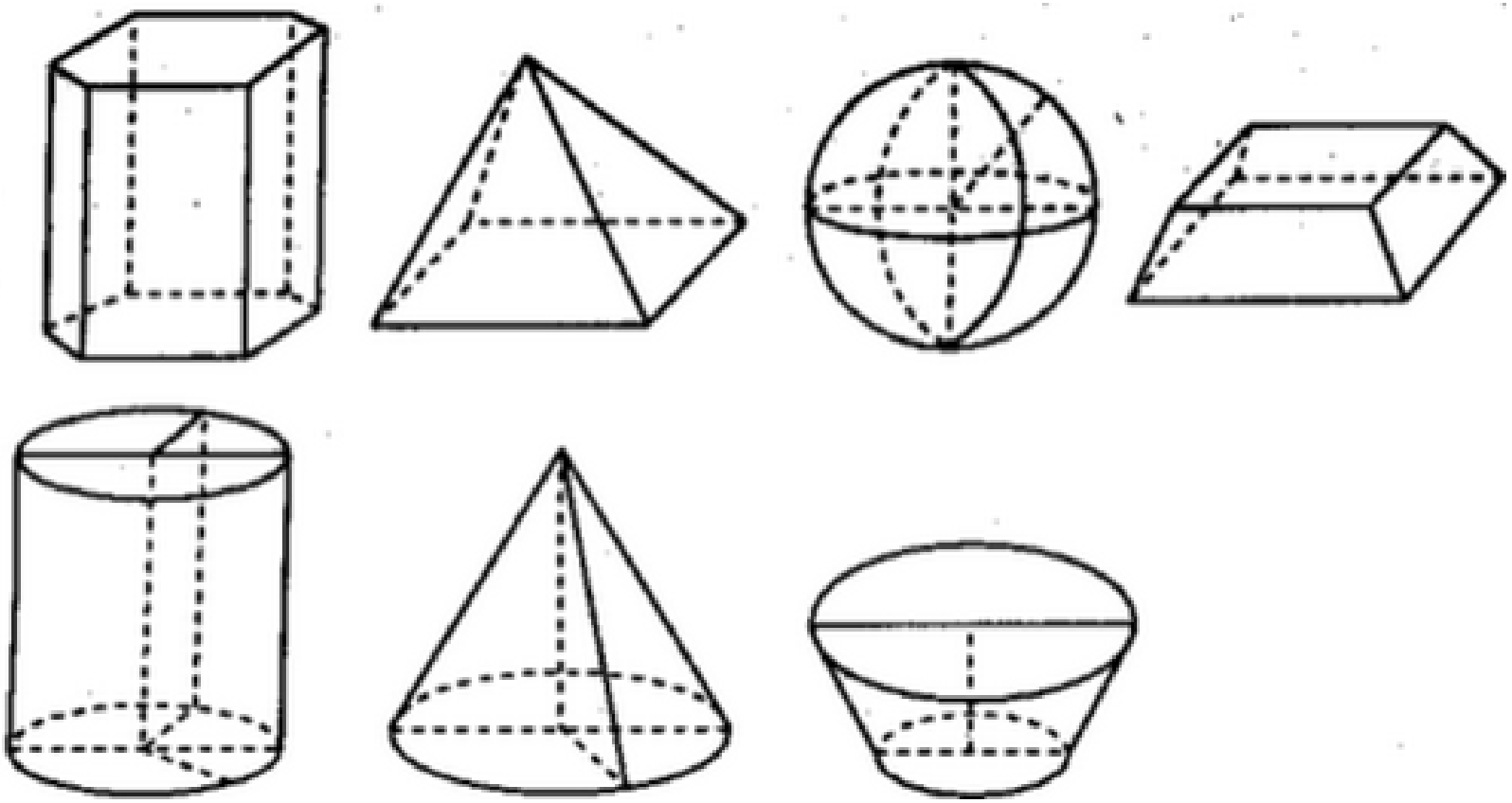
3D图形

3D中的“图像”：体素

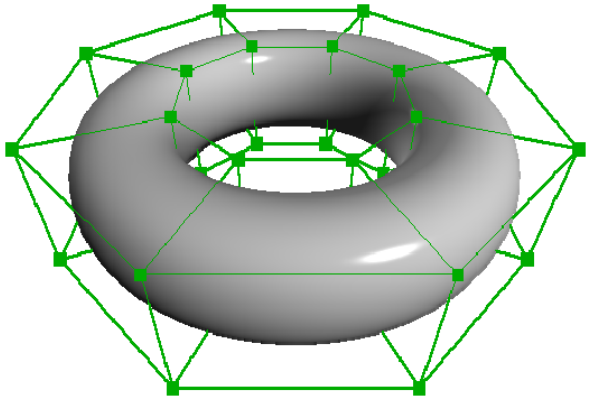
- 3D实体物体的逐层、逐像素采样



3D图形：3D实体表面的数学表达

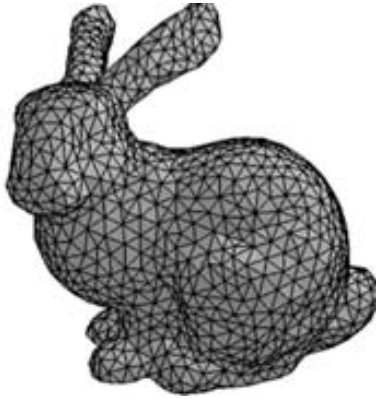


3D图形：3D实体的数学表达

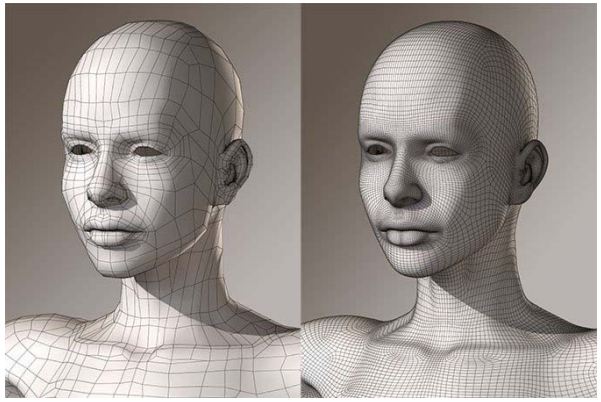


样条曲面(NURBS)

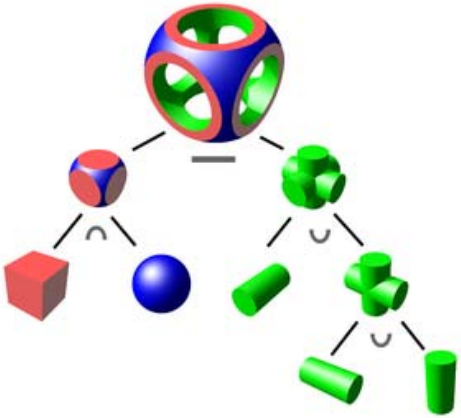
隐式曲面



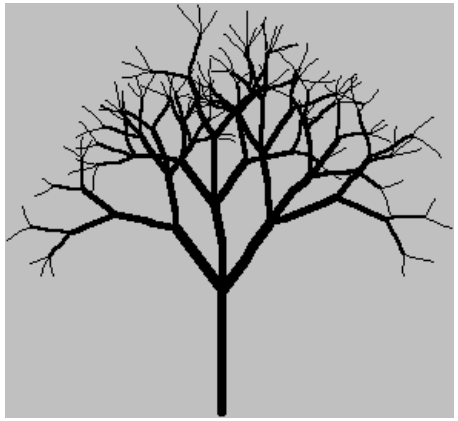
网格曲面



细分曲面



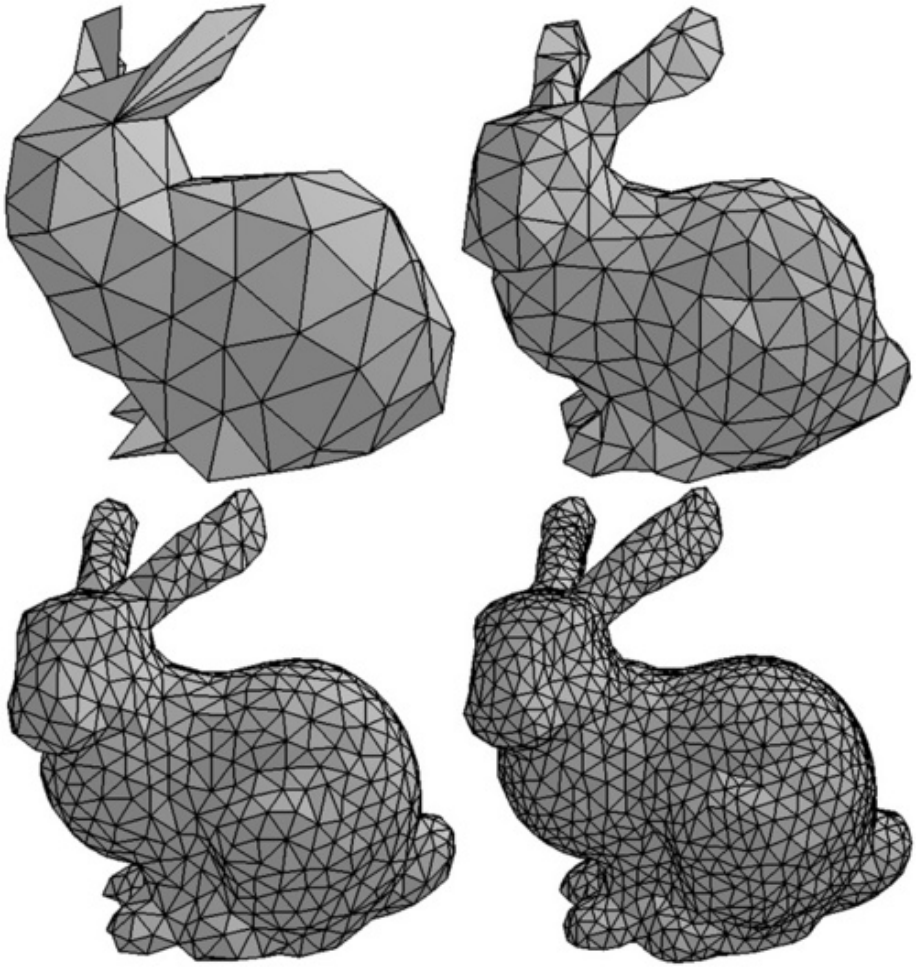
CSG曲面



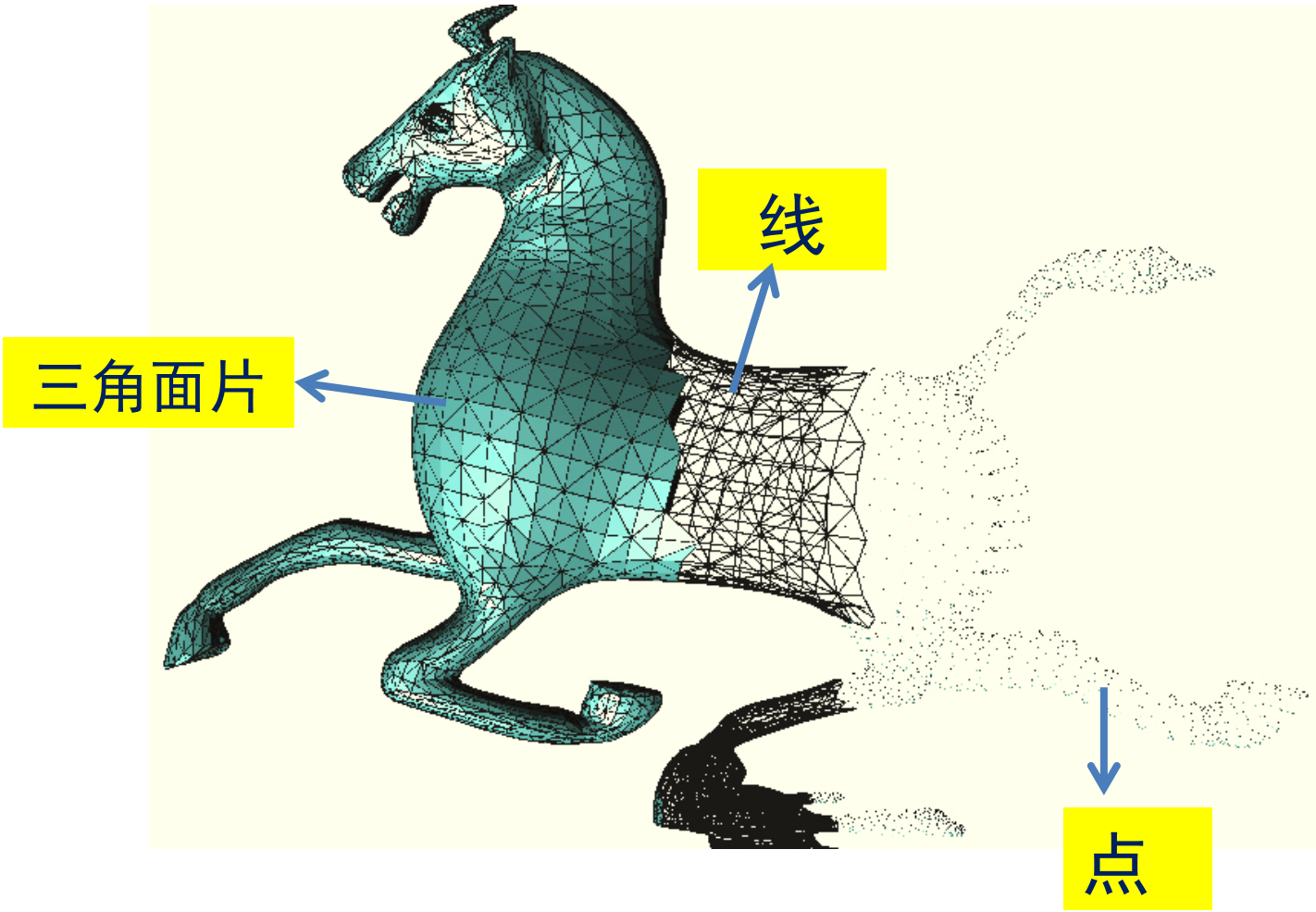
过程曲面

3D图形：3D网格曲面

陶瓷兔子实物



3D图形：3D中的矢量图形



3D图形的渲染：
转化为栅格图像（光栅化）

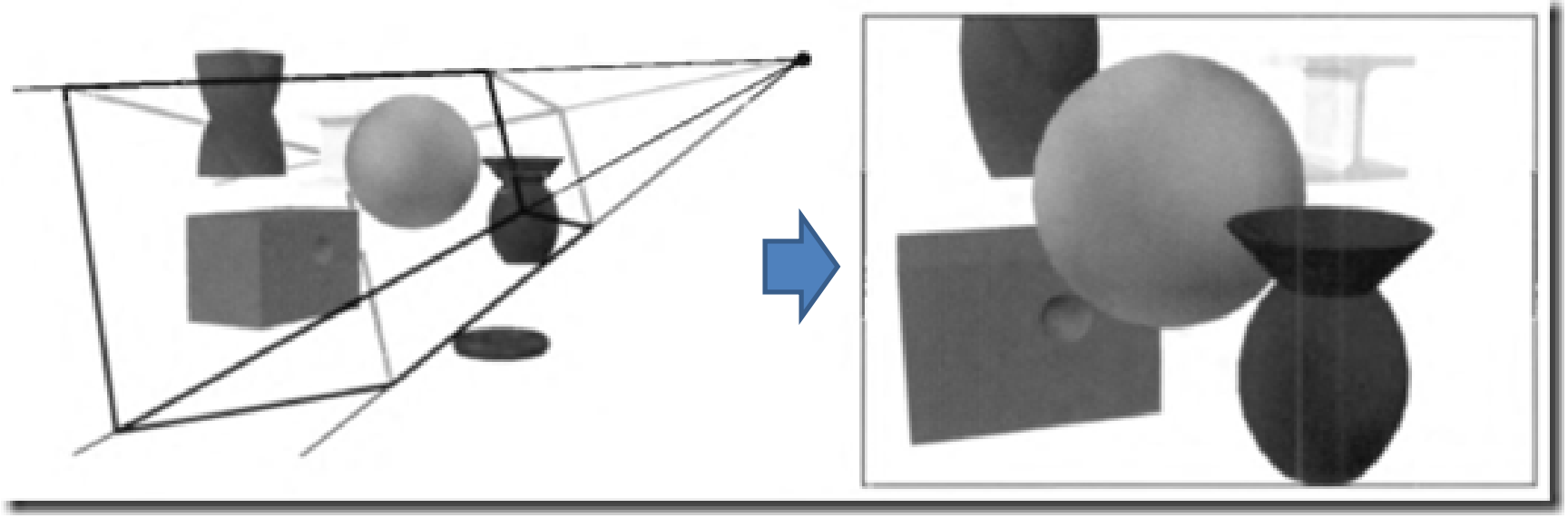
- 真实感渲染
  - 输入：3D图形场景
  - 输出：在一定光照条件下该场景的照片级图像

3D图形场景

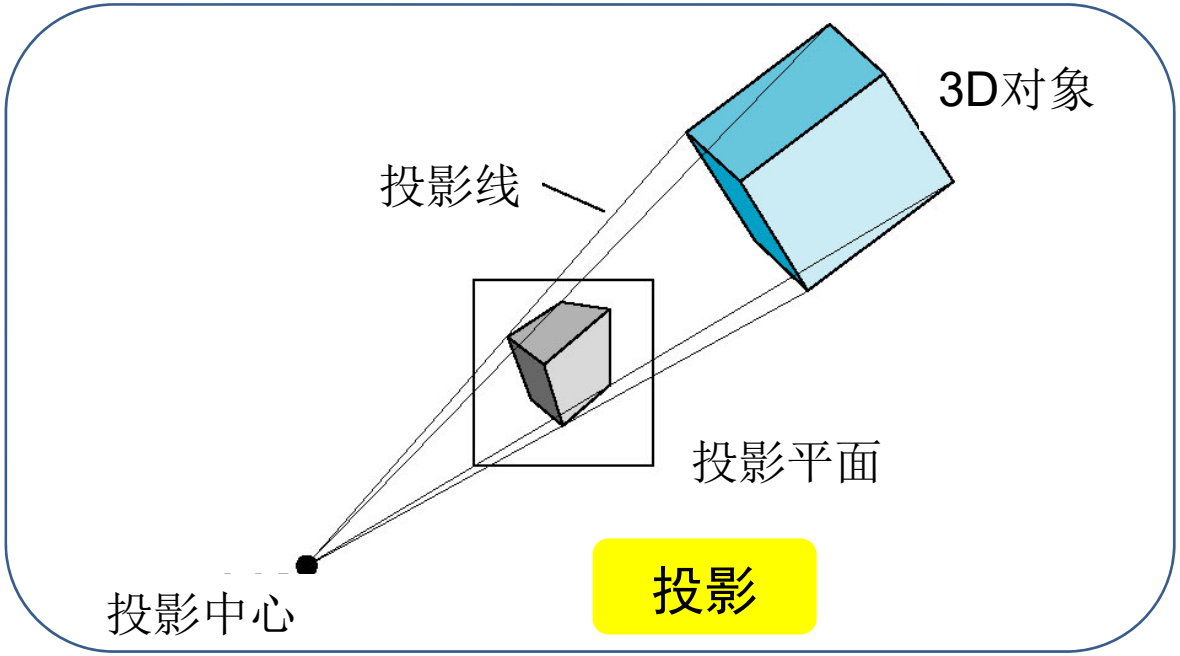
真实感渲染的图像

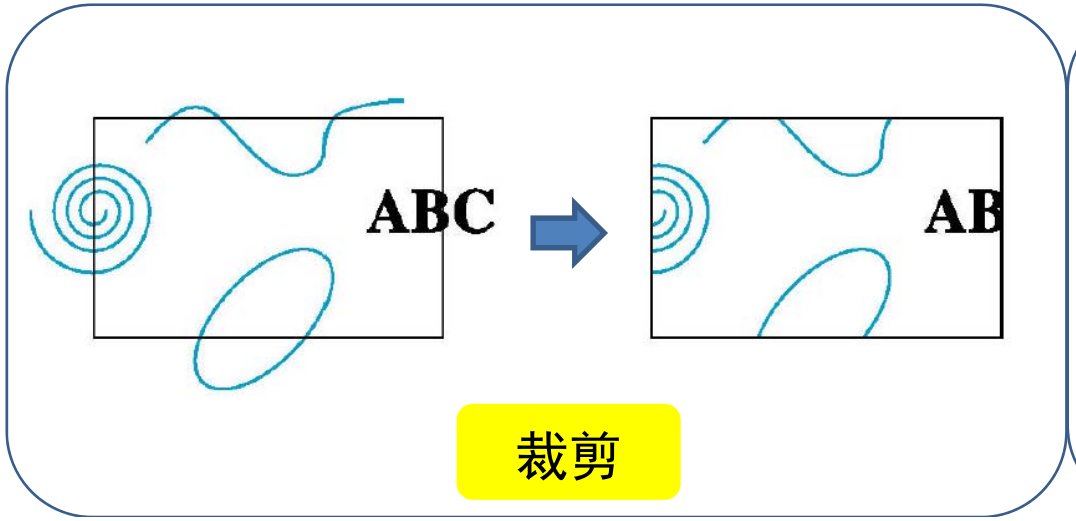
3D渲染的主要过程

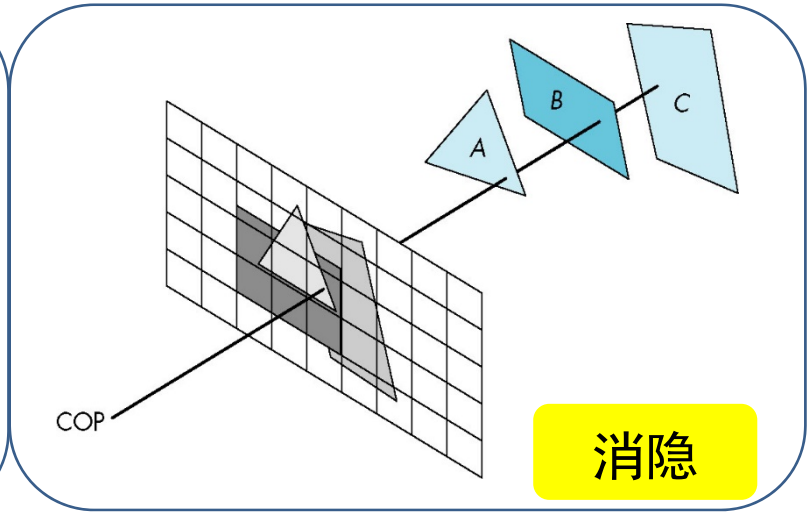
- 几何计算：将3D矢量转化为2D矢量
  - 投影变换、裁剪、消隐
- 像素计算：将每个像素赋予颜色
  - 光照、阴影、纹理、环境映射、材质…



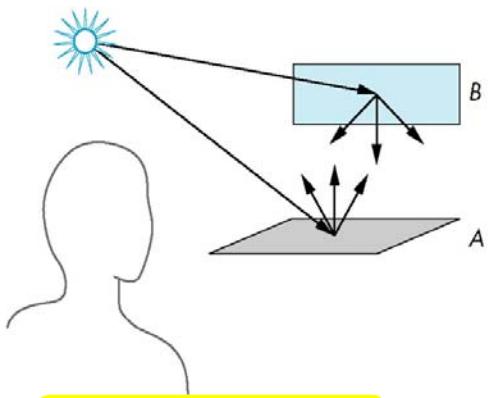
3D渲染的主要过程：几何计算



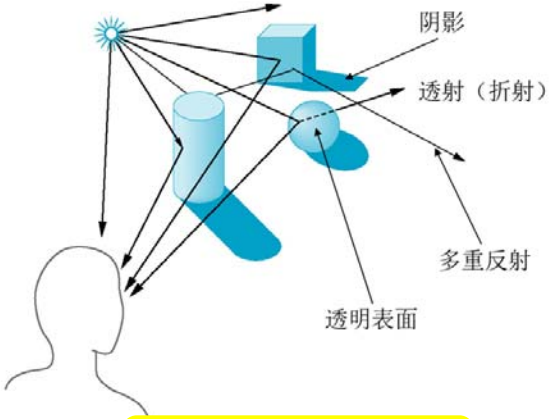




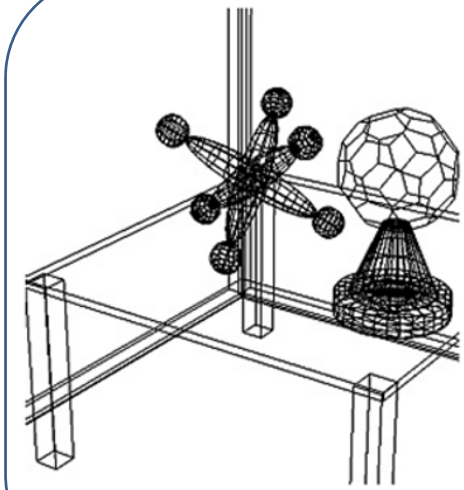
3D渲染的主要过程：像素计算



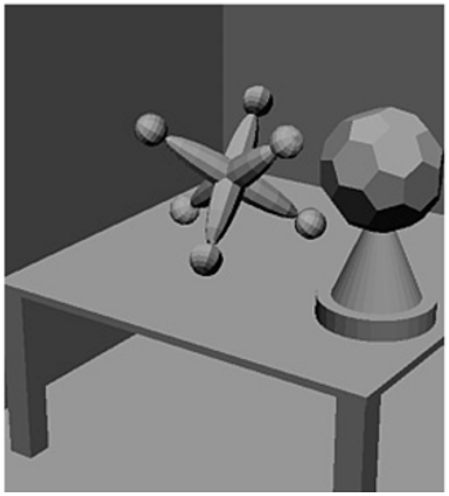
局部光照模型



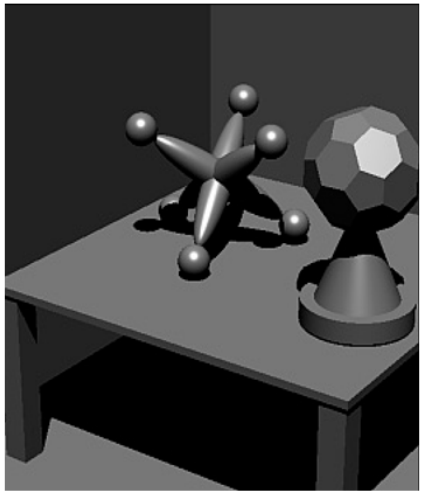
全局光照模型



(a)



亮度



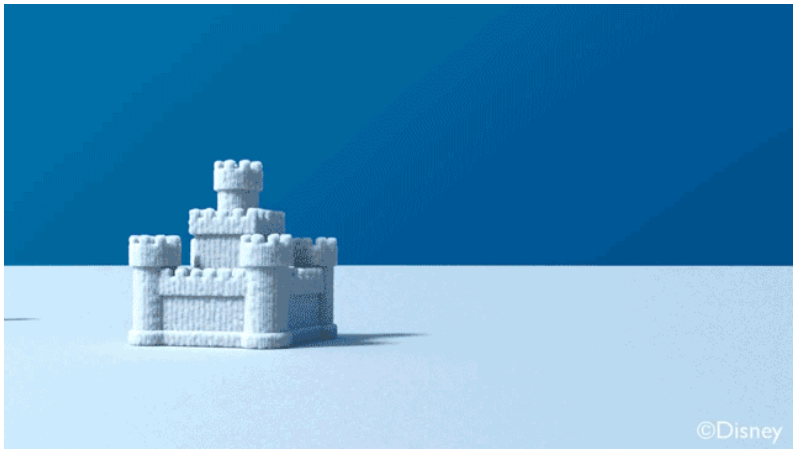
阴影

纹理

3D动态图形：动画序列

- 基于几何的方法：关键帧插值

- 基于物理的方法（仿真）：由物理规律计算得到



提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

计算机图形学

用计算的方法，将物理世界映射到虚拟数字世界
（即，对物体的几何与物理属性与规律
进行建模与动画，并进行呈现与交互），
再通过虚拟世界的计算最终反向作用于现实世界

内容生成

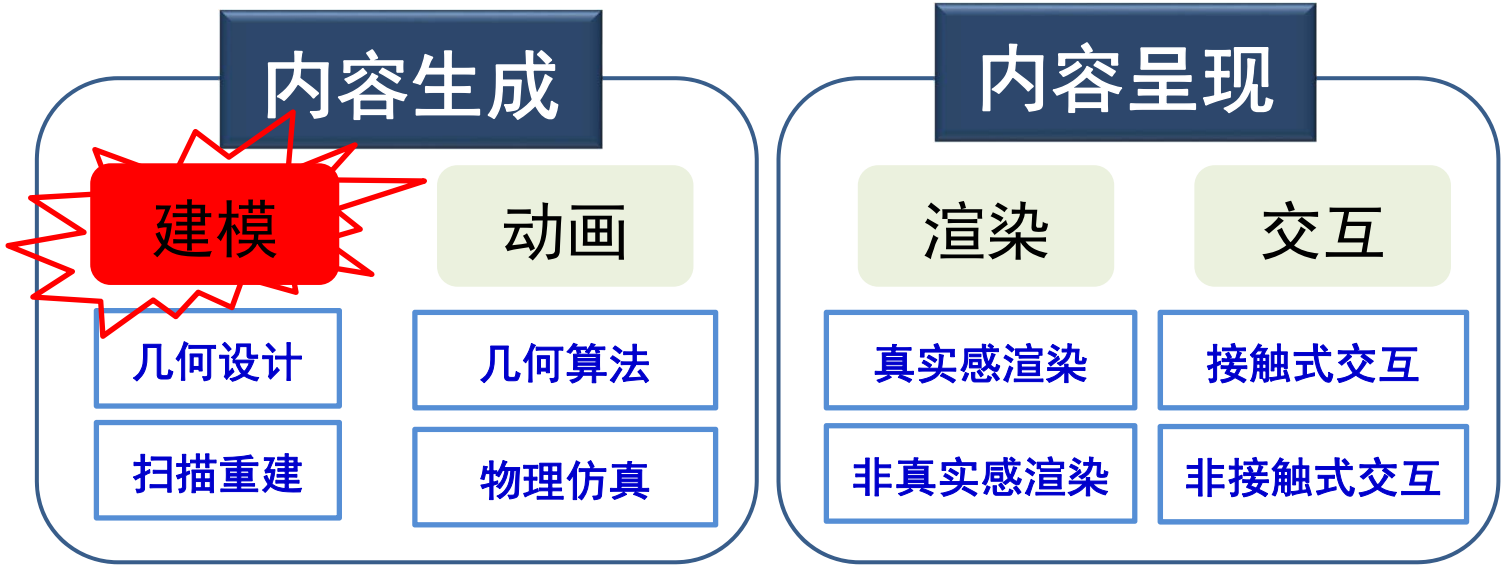
- 建模
  - 几何设计
  - 扫描重建
- 动画
  - 几何算法
  - 物理仿真

内容呈现

- 渲染
  - 真实感渲染
  - 非真实感渲染
- 交互
  - 接触式交互
  - 非接触式交互

计算机图形学

用**计算**的方法，将物理世界映射到虚拟数字世界
（即，对物体的**几何**与**物理**属性与规律
进行**建模**与**动画**，并进行**呈现**与**交互**），
再通过虚拟世界的**计算**最终反向作用于现实世界



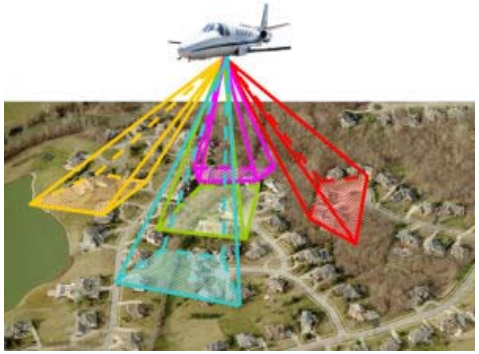
计算机图形学-1：建模

- (1.1) 3D重建：对已存在的物体，通过设备采集数据或进行测量来构建3D模型

单个相机

深度相机

车载激光扫描仪

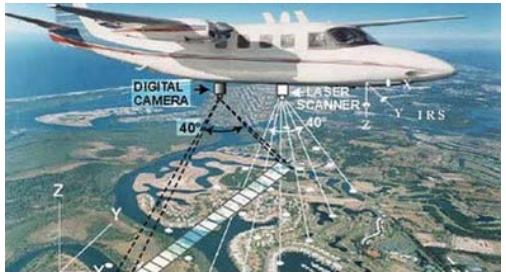


倾斜摄影

多个相机

激光扫描仪(LiDAR)

全站仪

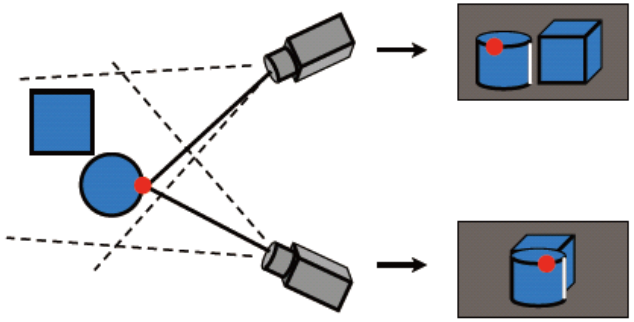


遥感

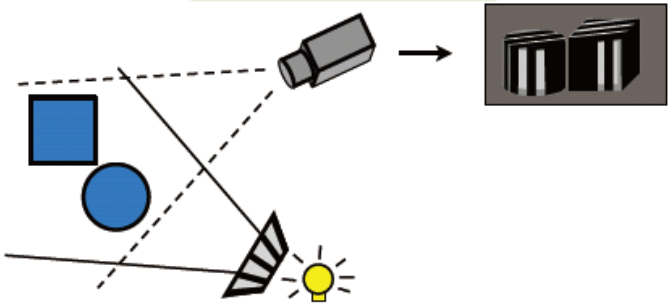
计算机图形学-1：建模

- (1.1) 3D重建：对已存在的物体，通过设备采集数据或进行测量来构建3D模型

视觉方法

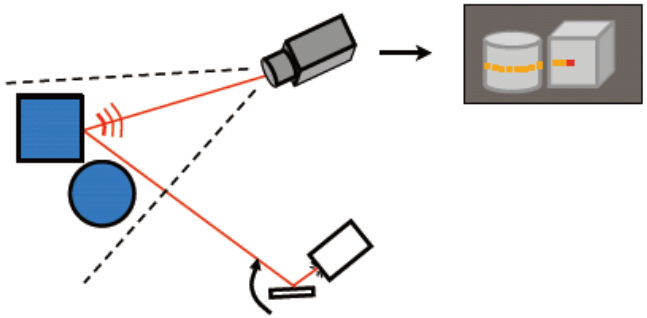


多视点几何

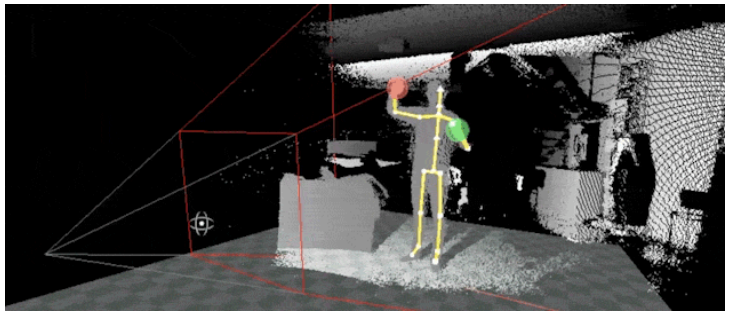


结构光（白光）

主动探测方法



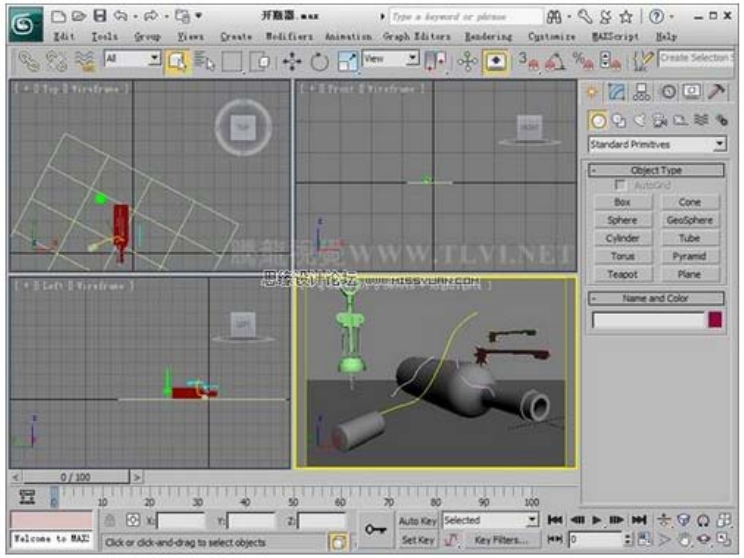
激光三角测距



散斑测距（深度相机）

计算机图形学-1：建模

- (1.2) 3D设计：对不存在的物体，使用建模软件或相关算法通过交互来构建3D模型



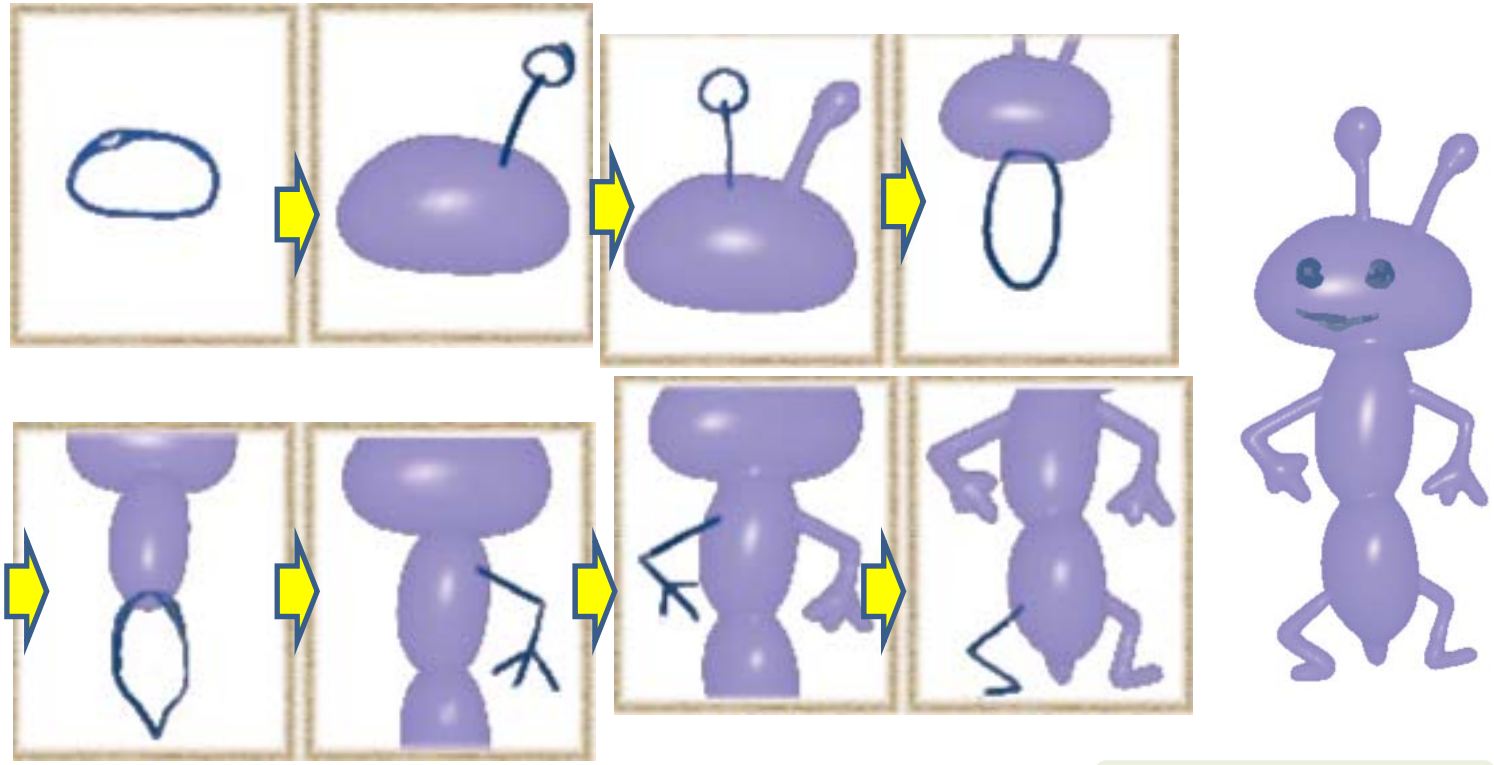
- 3DS Max
- Maya
- Rihno
- …

基于建模软件

- Zbrush
- Mudbox
- 3D Coat
- …

计算机图形学-1：建模

- (1.2) 3D设计：对不存在的物体，使用建模软件或相关算法通过交互来构建3D模型

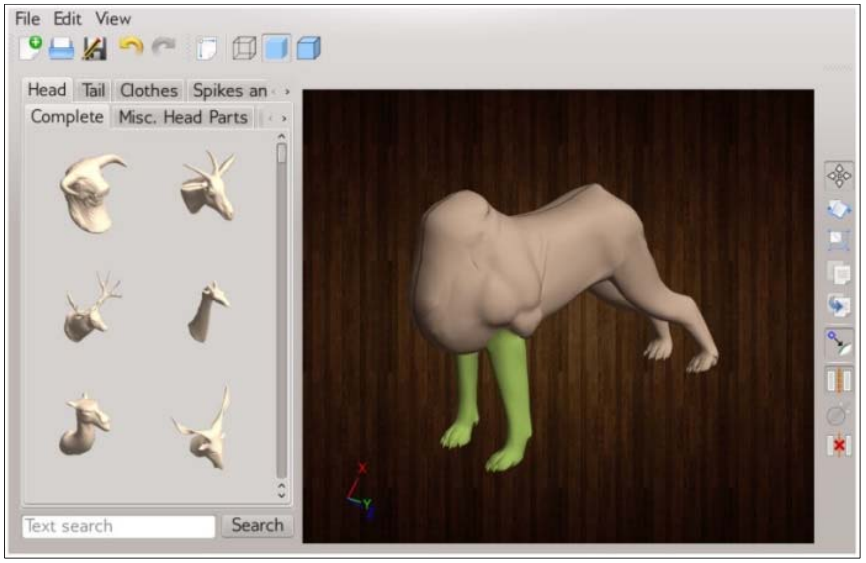


基于草图交互

计算机图形学-1：建模

- (1.2) 3D设计：对不存在的物体，使用建模软件或相关算法通过交互来构建3D模型

[Funkhouser et al. 2004]



[Chaudhuri et al. 2011]

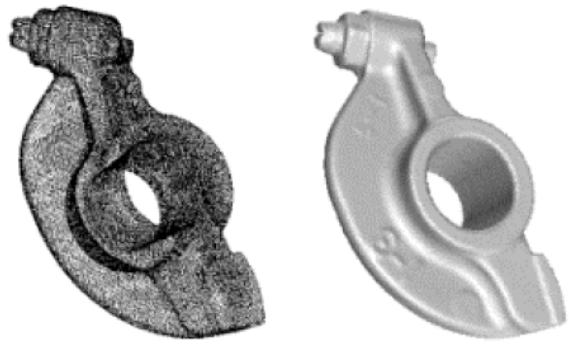
基于知识学习

计算机图形学-1：建模

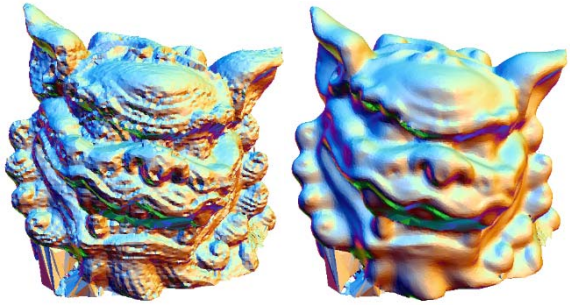
- (1.3) 特殊物体的3D建模

计算机图形学-1：建模

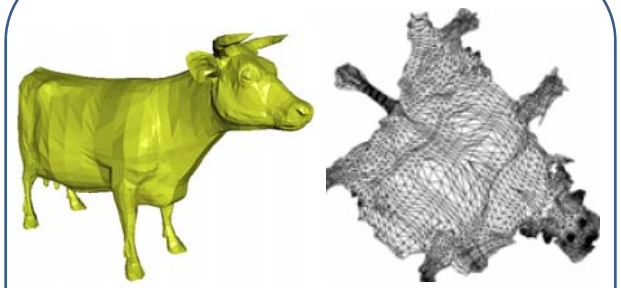
- (1.4) 几何处理



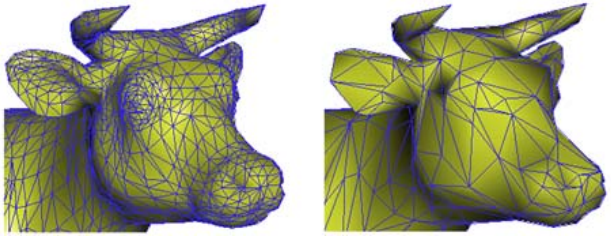
曲面重建



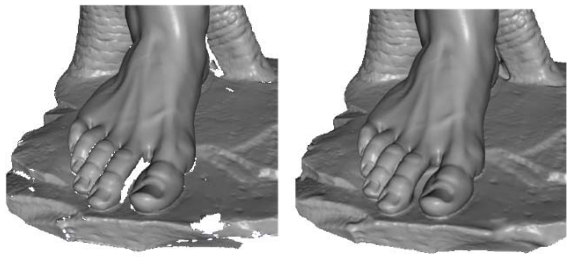
曲面去噪（光顺）



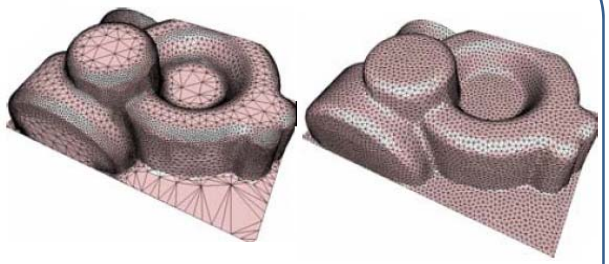
曲面参数化



曲面简化(LOD)



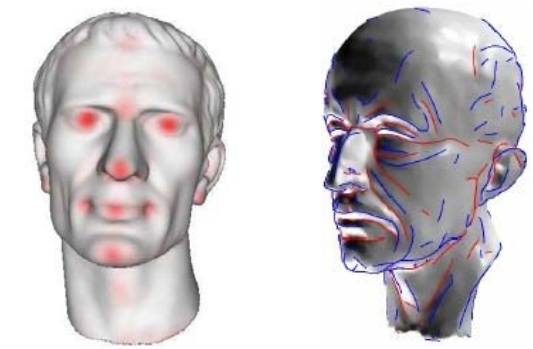
曲面修复



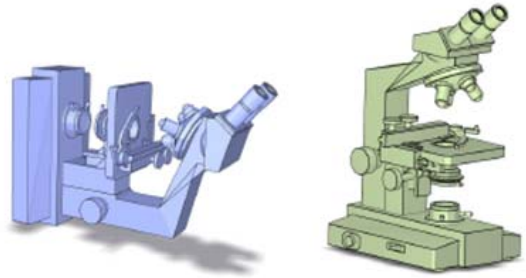
重网格化

计算机图形学-1：建模

- (1.5) 形状理解与分析

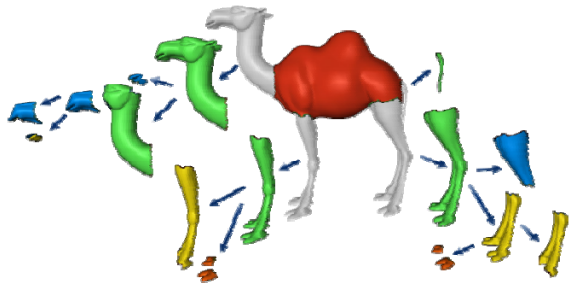


特征分析

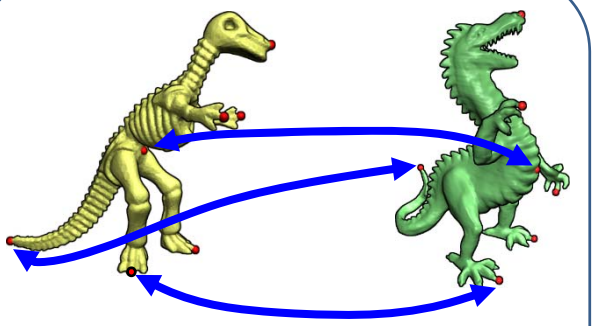


正朝向分析

形状分割



对称分析

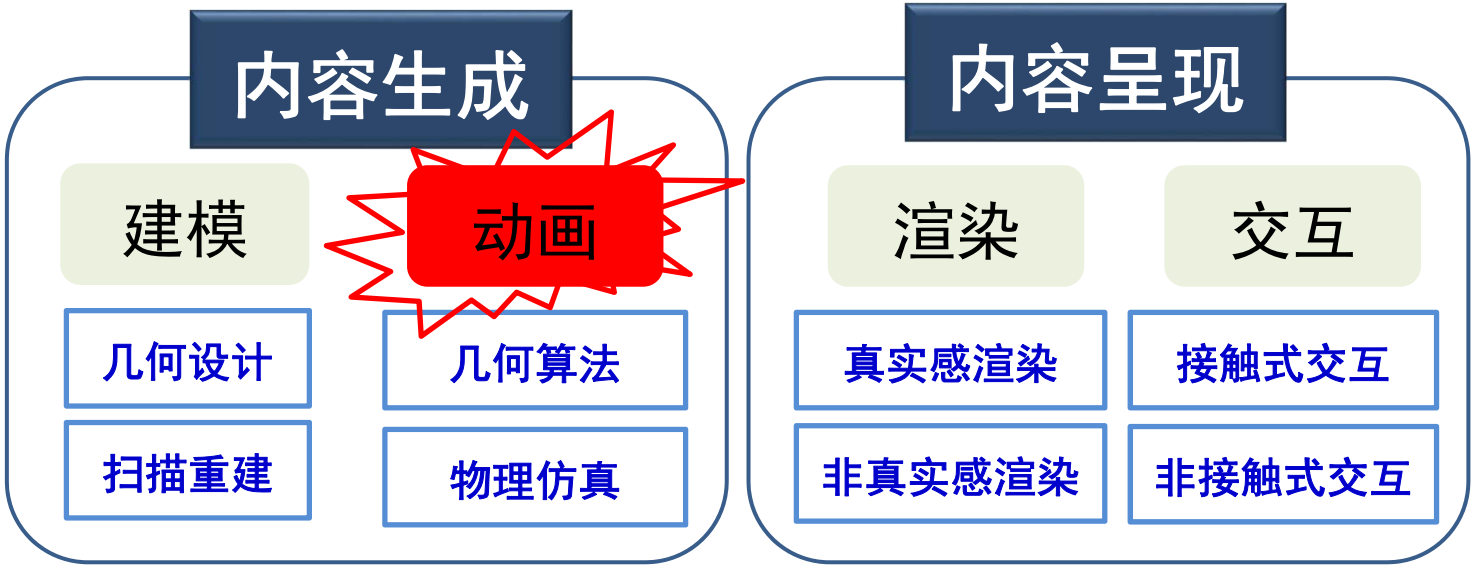


顶点对应

形状匹配

计算机图形学

用**计算**的方法，将物理世界映射到虚拟数字世界
（即，对物体的**几何**与**物理**属性与规律
进行**建模**与**动画**，并进行**呈现**与**交互**），
再通过虚拟世界的**计算**最终反向作用于现实世界



计算机图形学-2：动画

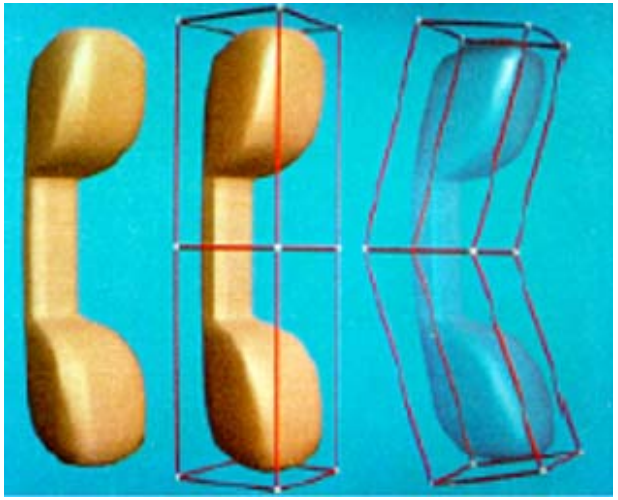
- (2.1) 动作捕捉与迁移(Motion capturing)

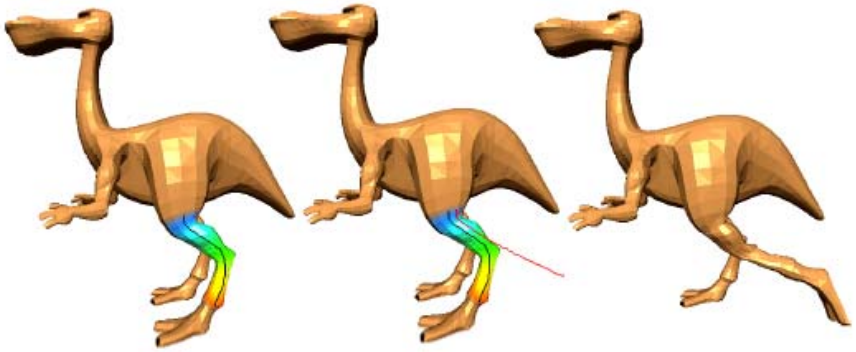
计算机图形学-2：动画

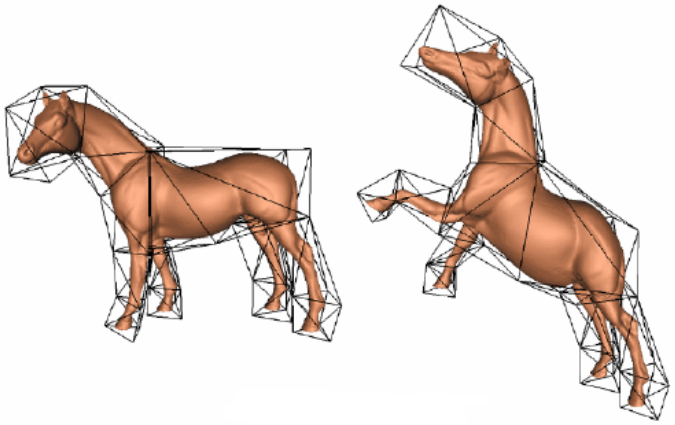
- (2.2) 动态物体的采集与重建
  - 离线高质量的重建方法
  - 实时动态的重建方法
  - 基于深度学习的重建方法

计算机图形学-2：动画

- (2.3) 基于几何编辑/变形的动画
  - 基于代理（骨架、cage…）的方法（重心坐标）
  - 基于几何量（坐标、内在变量、微分坐标…）的方法

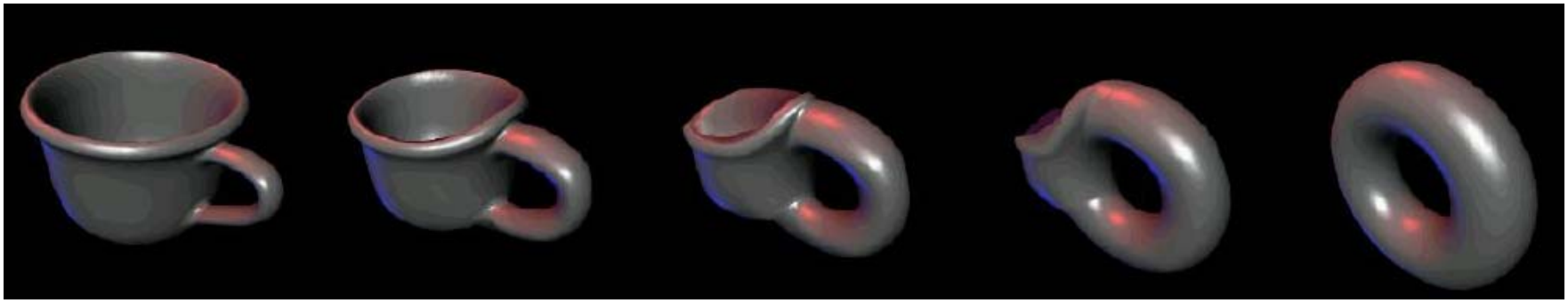


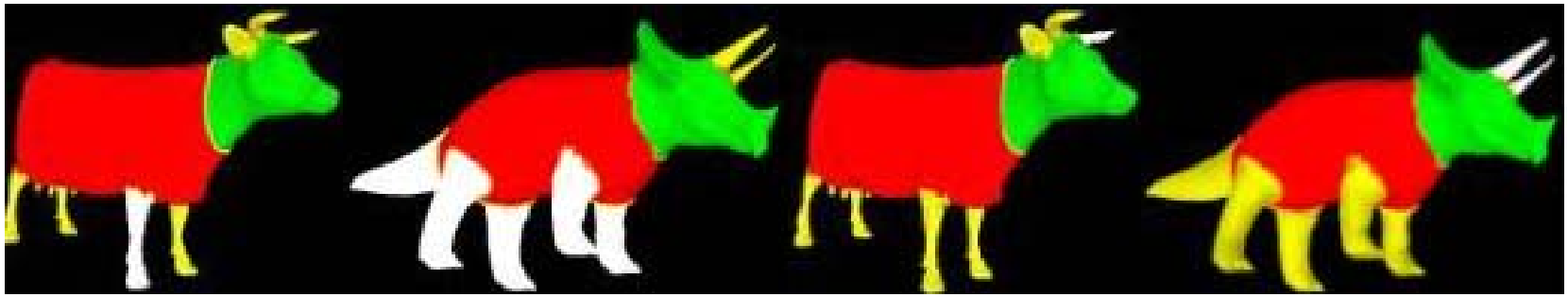


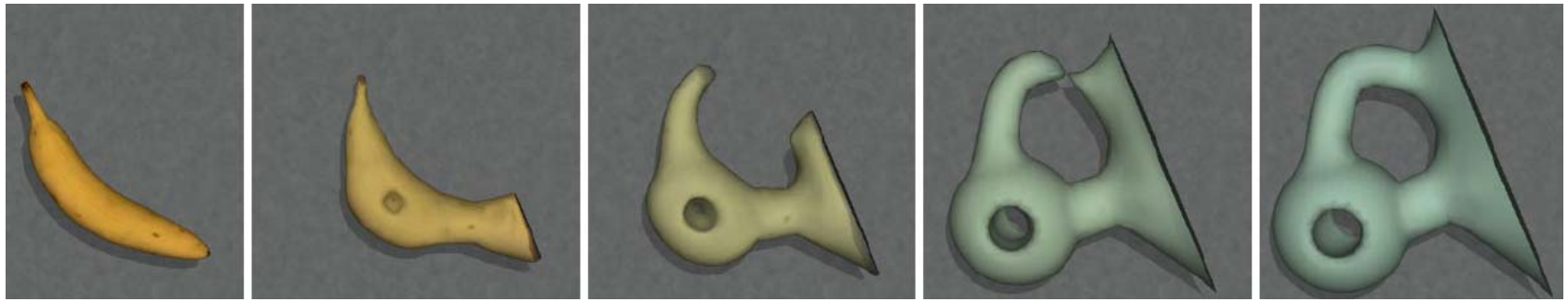


计算机图形学-2：动画

- (2.4) 基于插值的关键帧动画

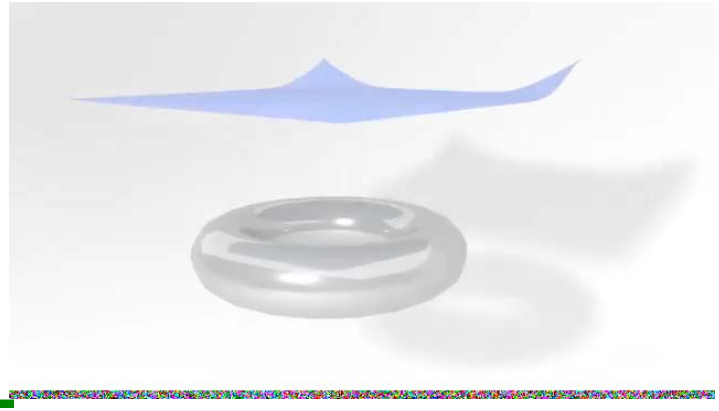


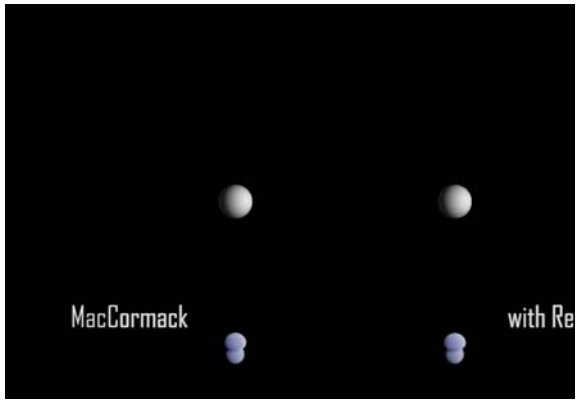


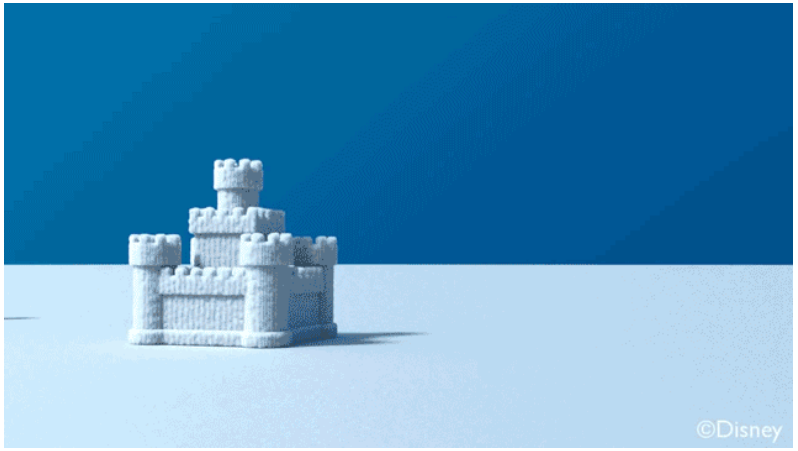


计算机图形学-2：动画

- (2.5) 基于物理的仿真动画：数值求解PDE

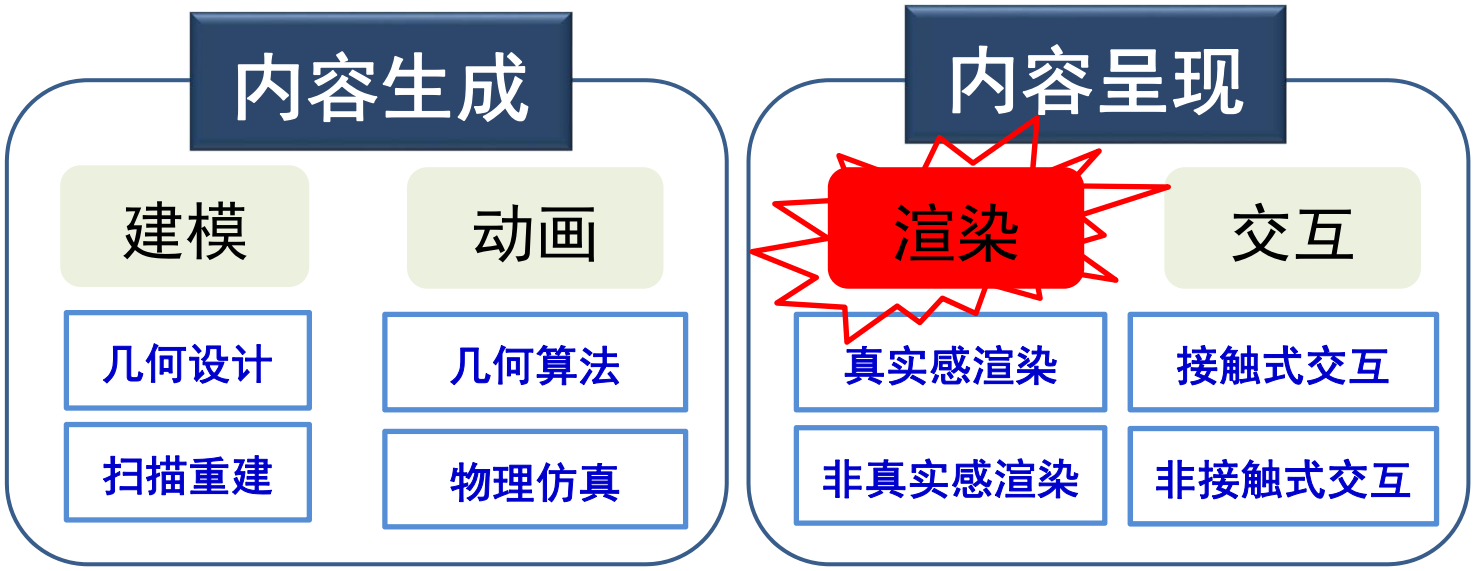




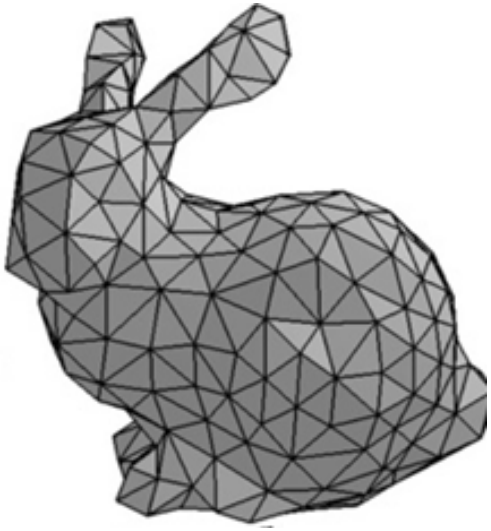


计算机图形学

用计算的方法，将物理世界映射到虚拟数字世界
（即，对物体的几何与物理属性与规律
进行建模与动画，并进行呈现与交互），
再通过虚拟世界的计算最终反向作用于现实世界



计算机图形学-3：渲染



材质
纹理
光照
环境
…

微观结构
次表面反射
BRDF
BTF
…

将3D模型数据“画”得真实（像照片）

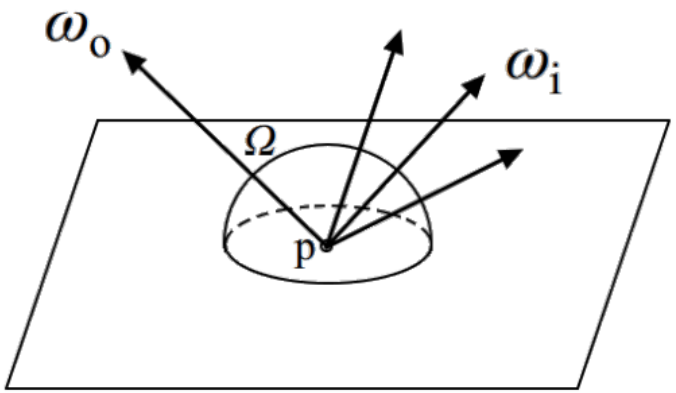
计算机图形学-3：渲染

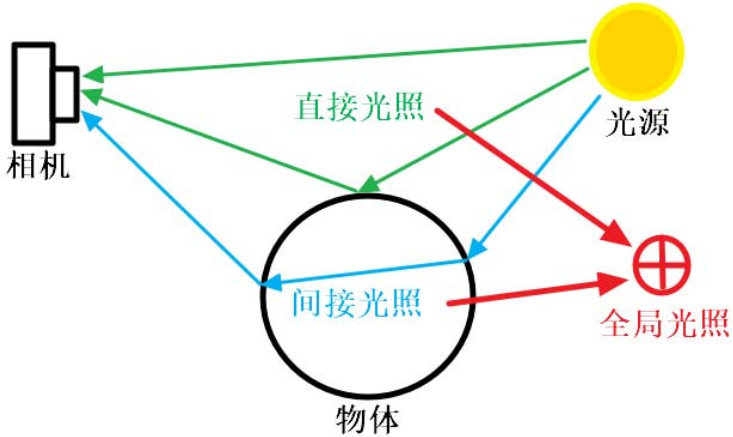
- 求解渲染方程

出射光　出射方向　描述表面反射规律的函数　入射光

$$L_o(\mathbf{p},\omega_o) = L_e(\mathbf{p},\omega_o) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{p},\omega_i \to \omega_o) L_i(\mathbf{p},\omega_i) \cos\theta \, \mathrm{d}\omega_i$$

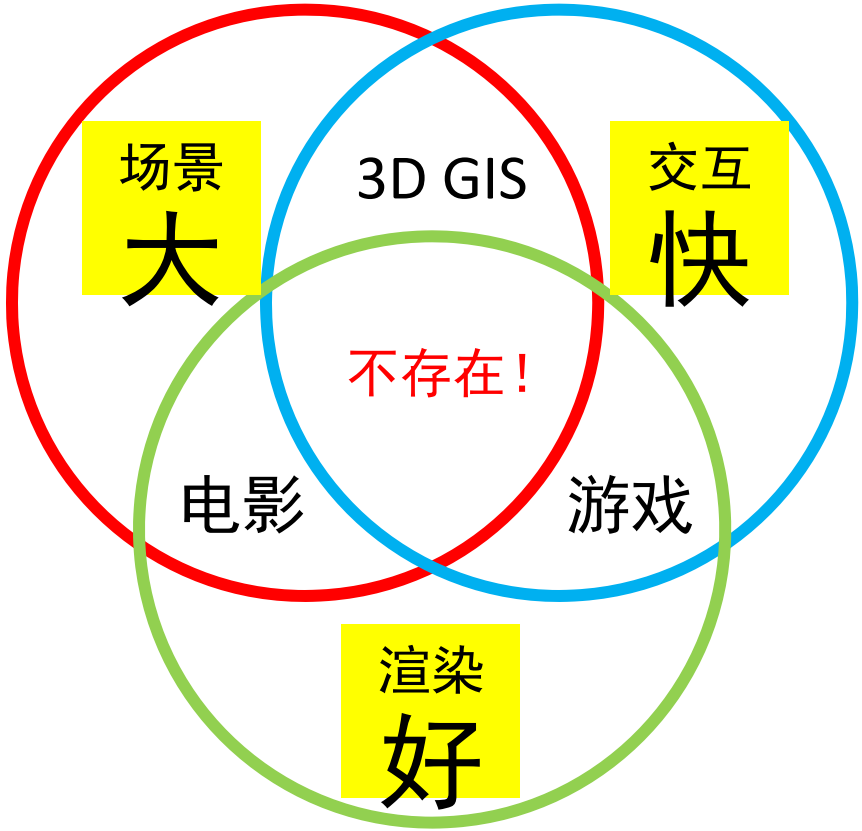
位置　自发光　半球面　入射方向　法向与入射方向的夹角





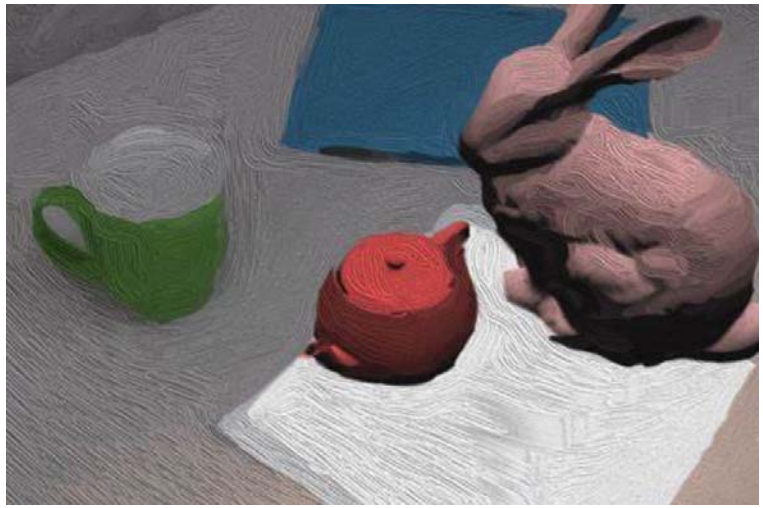
计算机图形学-3：渲染

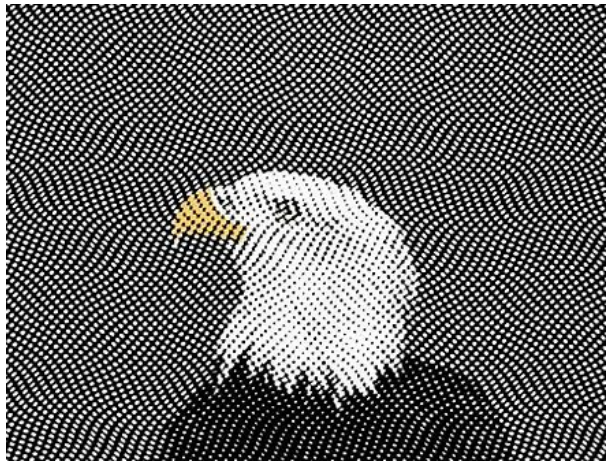
- 各种3D渲染引擎的定位与比较



计算机图形学-3：渲染

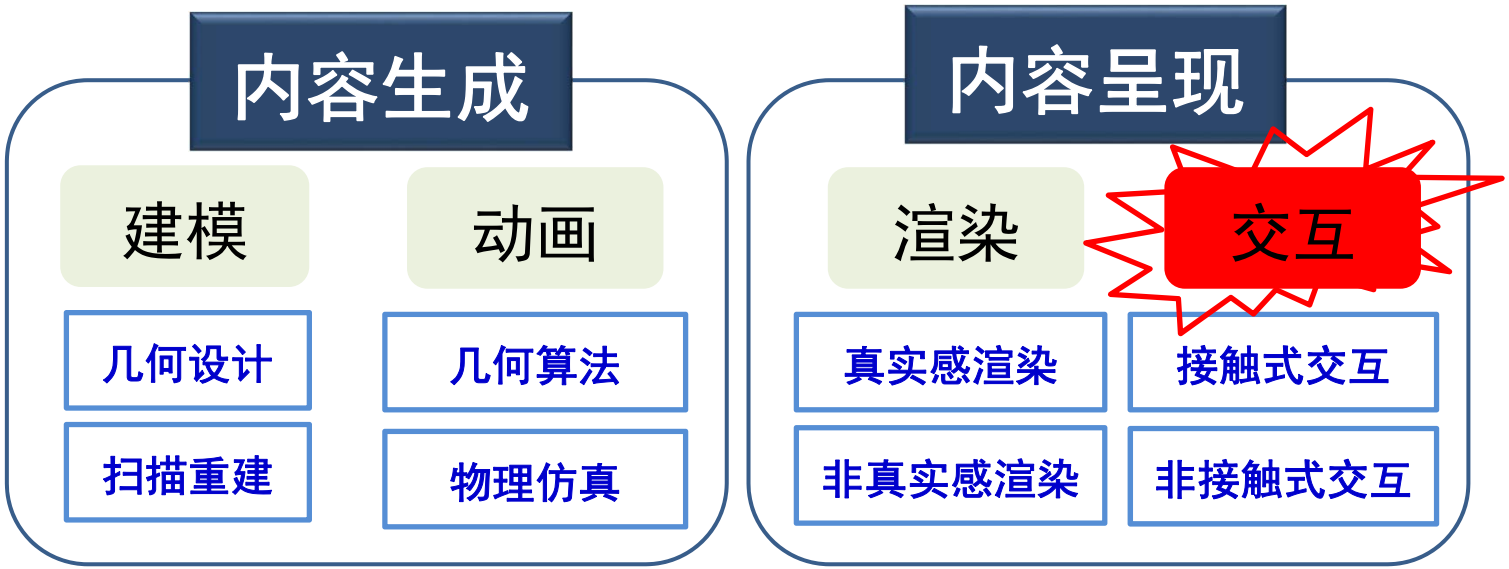
- 非真实感渲染





计算机图形学

用计算的方法，将物理世界映射到虚拟数字世界
（即，对物体的几何与物理属性与规律
进行建模与动画，并进行呈现与交互），
再通过虚拟世界的计算最终反向作用于现实世界



计算机图形学-4：人机交互

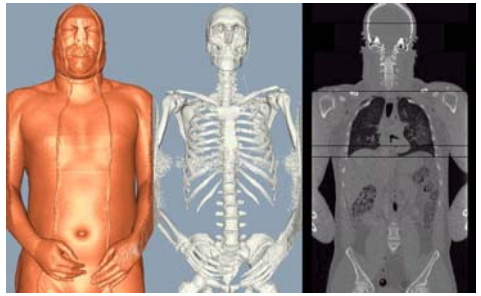
- 键盘
- 鼠标
- 语音
- 手势
- 体感
- 触感
- …

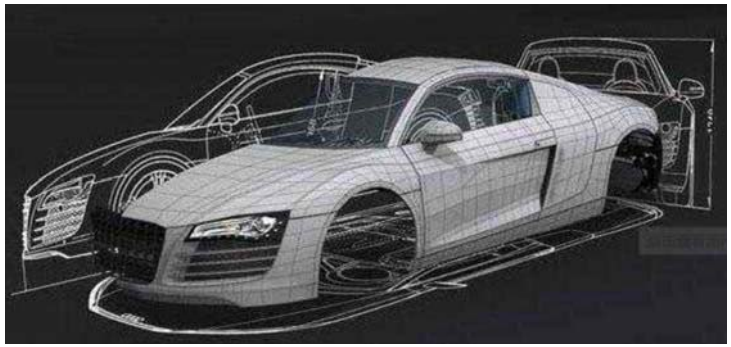
提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

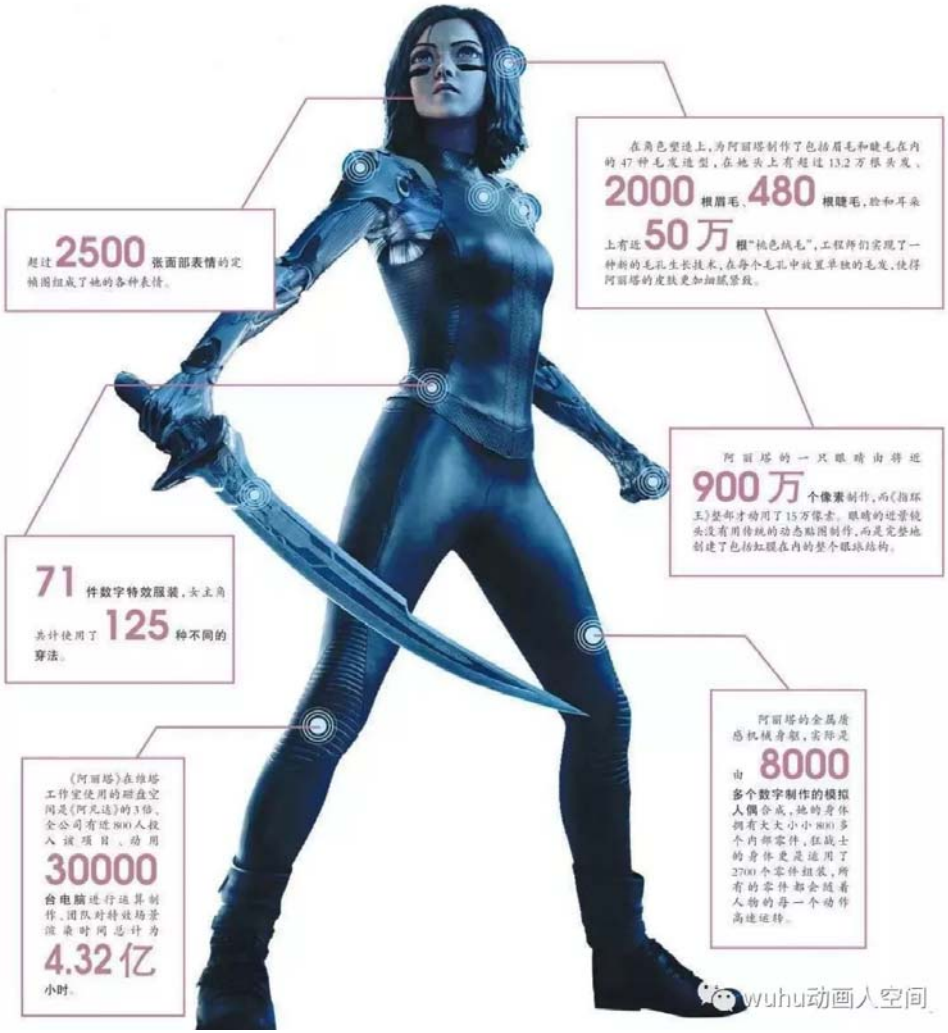
计算机图形学的应用领域

- 计算机游戏
- 电影、动画
- 工业产品设计
- 计算机仿真
- 虚拟现实与混合现实
- 数字地球与数字城市
- 可视化
- 医学
- 建筑与艺术
- …

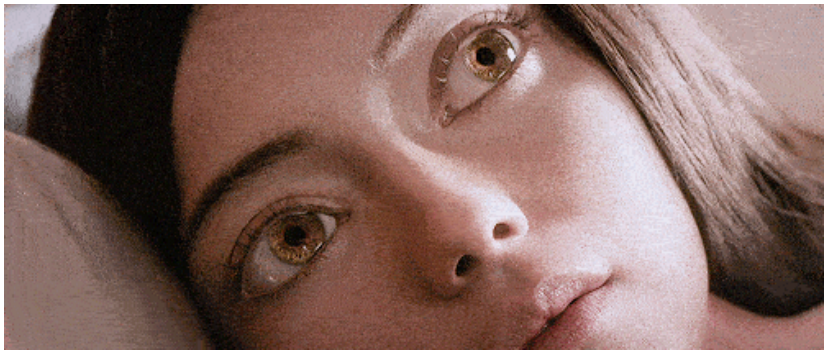




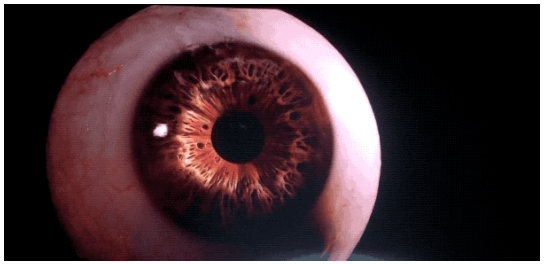
极致的应用：《阿丽塔：战斗天使》

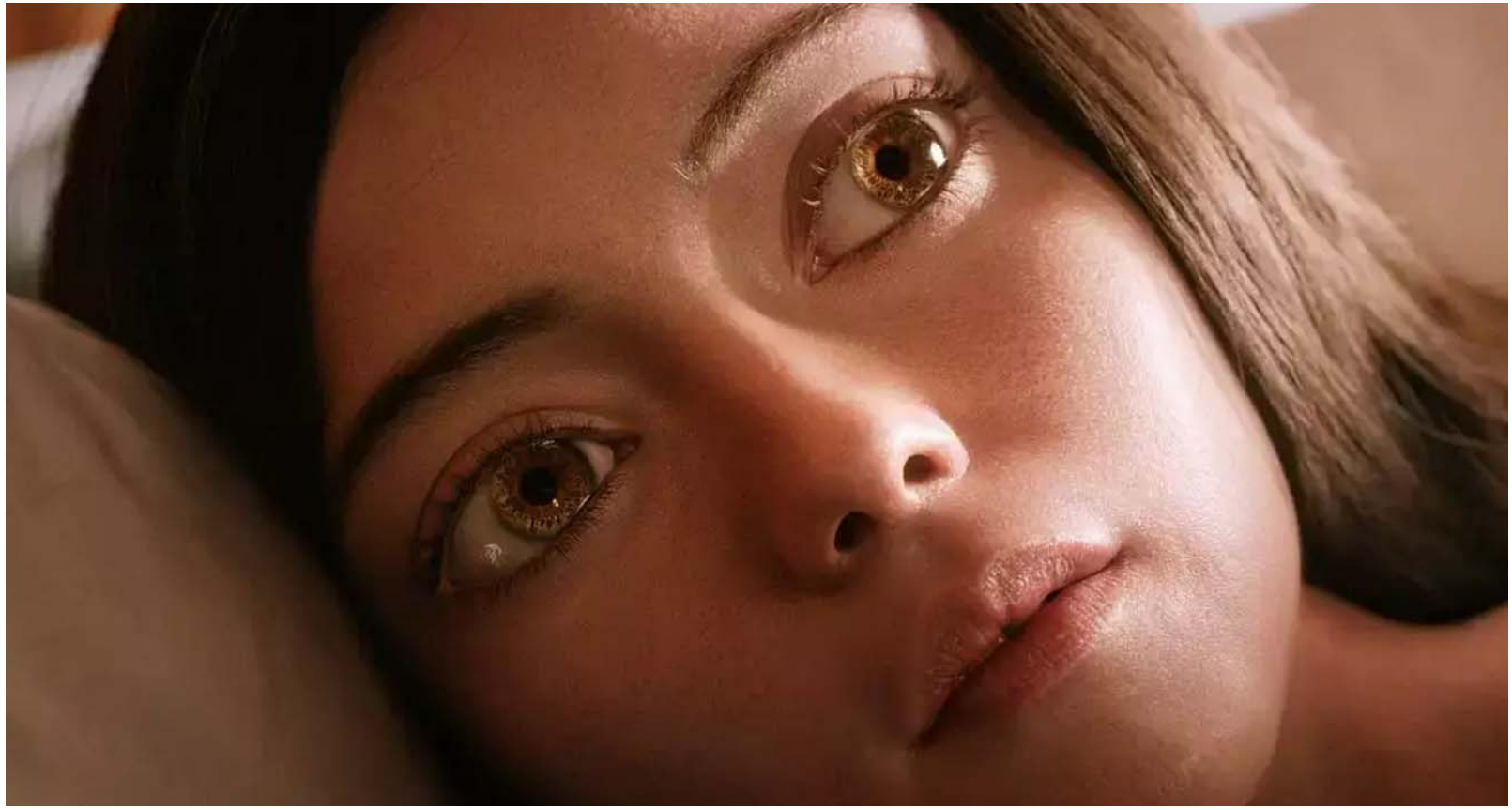


栩栩如生的阿丽塔



建模与渲染的极致

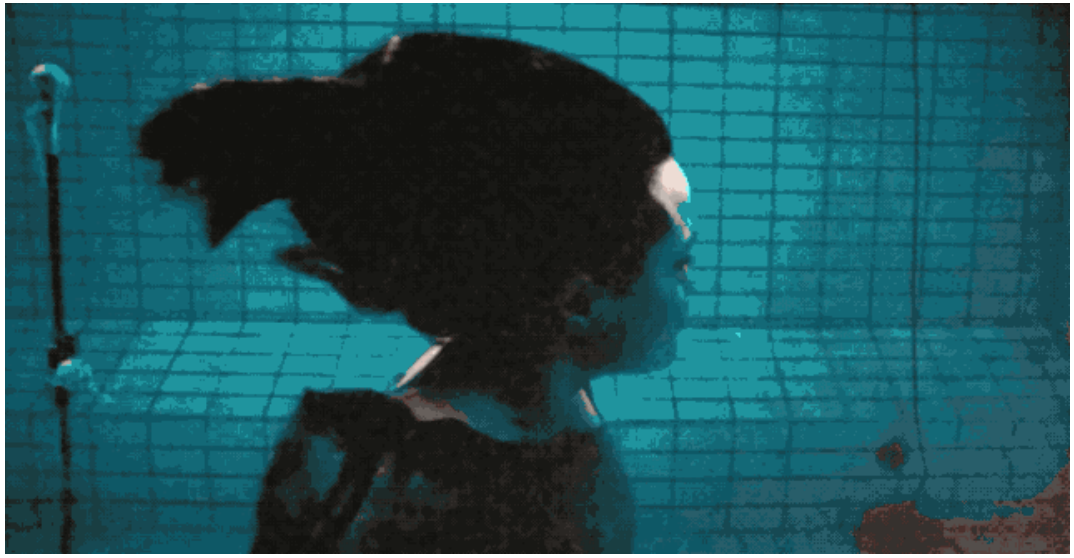


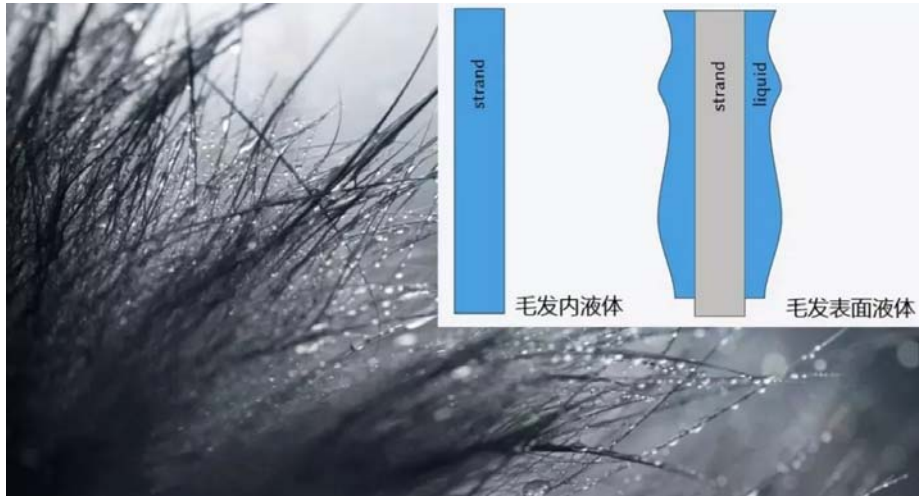


表情捕捉与迁移

动作捕捉与迁移

头发的建模、动画、渲染





更多最新电影中的CG技术...

提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

1. 3D建模软件：国外为主

- 动画建模软件
  - Autodesk (3DS Max, Maya), Rhino
  - Zbrush, MudBox, MeshMixer
- CAD/CAE/CAM工业软件
  - AutoCAD, EDA
  - CATIA, SolidWorks, UG NX, Pro/E
- 倾斜摄影软件
  - Smart3D -- ContextCapture (CC)
  - Altizure （香港/深圳）

2. 3D渲染引擎：国外为主

- 电影渲染引擎
  - RenderMan, Mental Ray, Maxwell Render
  - VRay, POV Ray
- 游戏渲染引擎
  - Unity3D (U3D), UnReal (UE), CryEngine (CE), Frostbite Engine, Unigine
  - 腾讯QuickSilverX, 网易NeoX, Messiah
- 城市渲染引擎
  - Google Earth, Skyline, ESRI ArcGIS, Cesium
  - 超图SuperMap，科澜CooRun，伟景行CityMaker

3. 国内的研究界与工业界的结合不够紧密

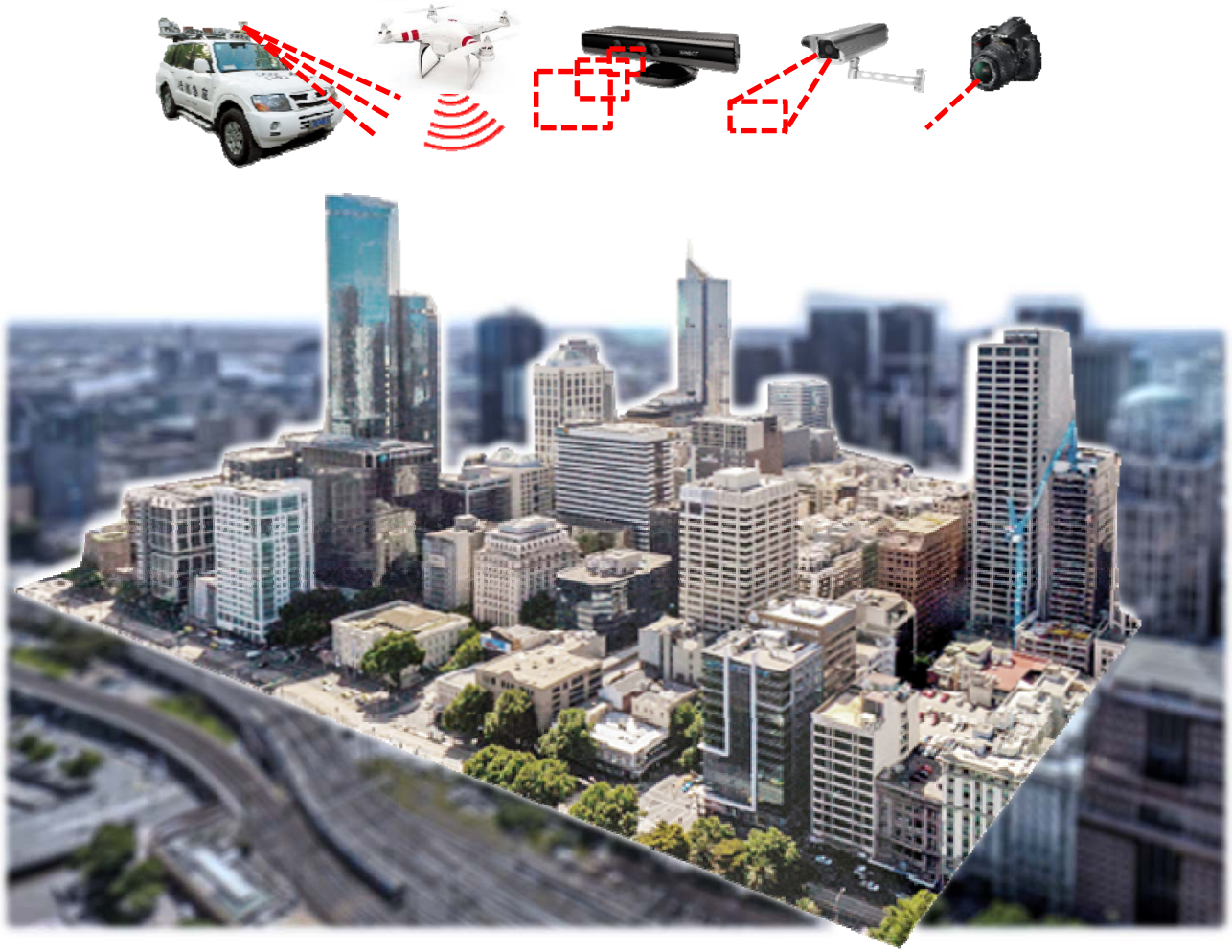
- 在美国有好莱坞—电影
- 工业界与学术界的合作项目
- 学术界教授去工业界或创业
- Siggraph会议
  - 工业界参与会议
  - 众多工业界的展品
- …

近年来，国内已逐渐有更多的结合和合作…（大环境驱动）

提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

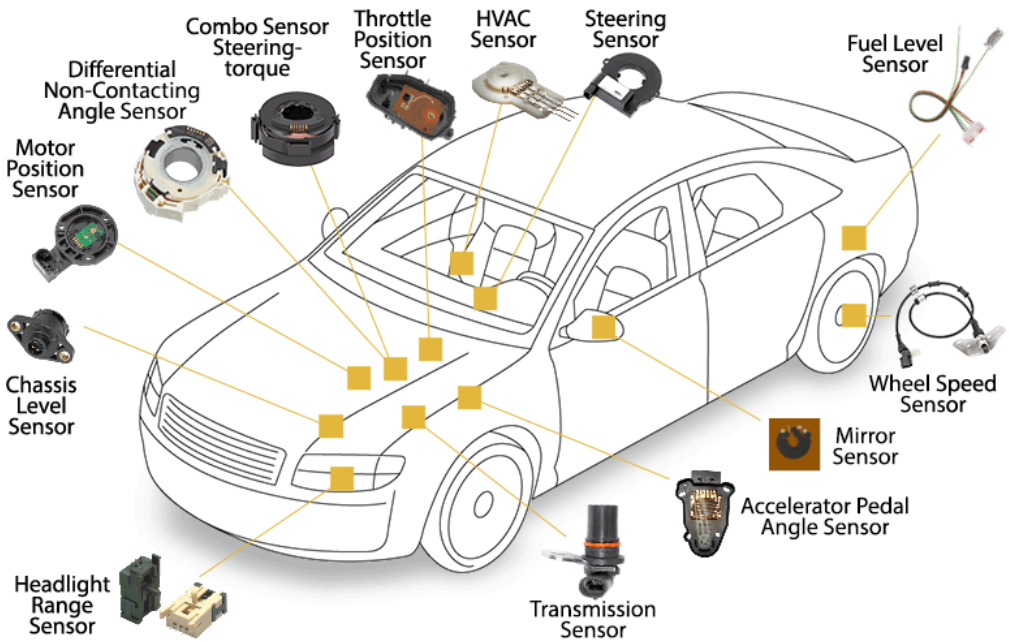
对世界的多模态数据感知



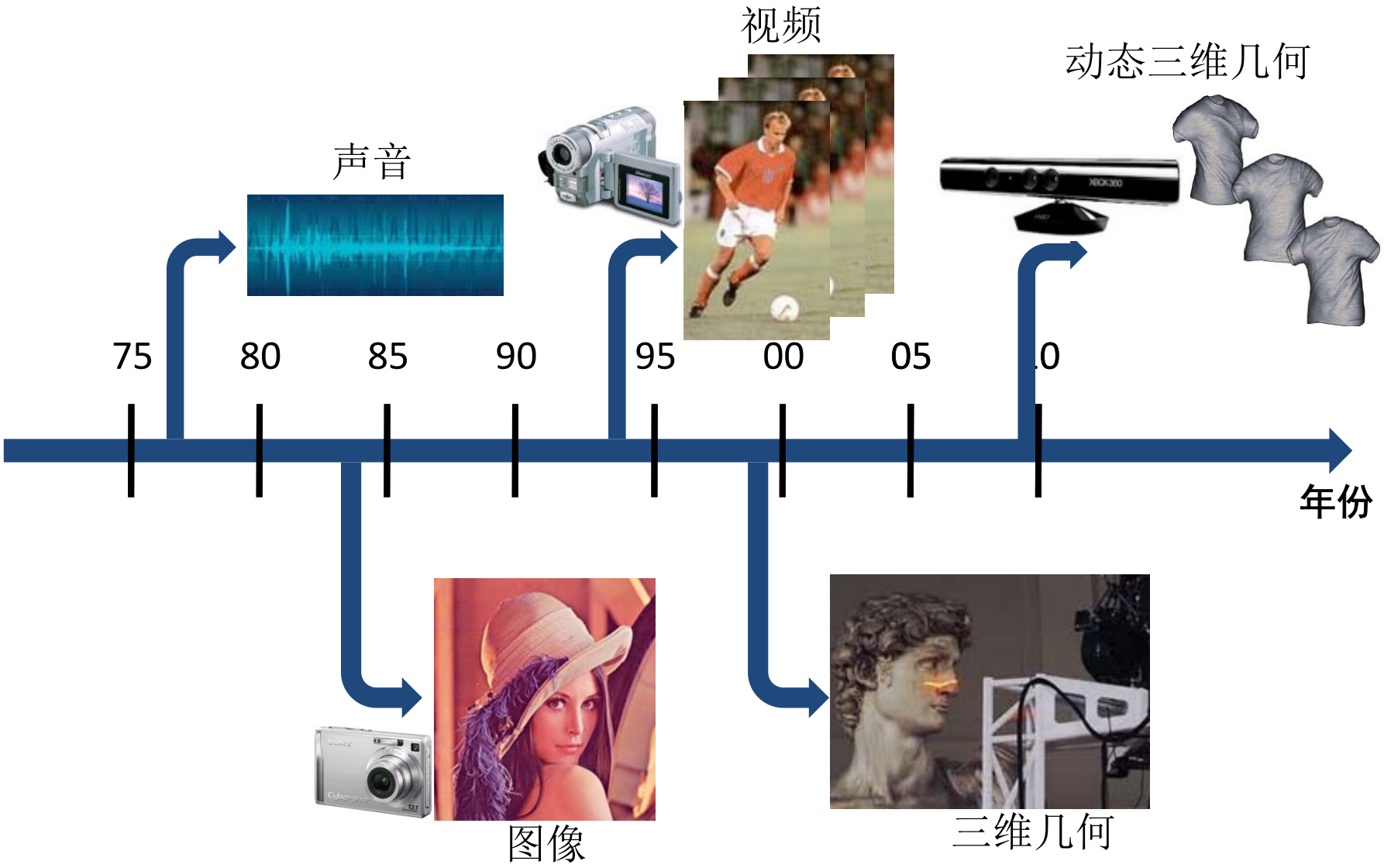
物联网感知：各种传感器

“耳听六路，眼观八方”

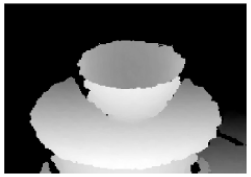
- 声音传感器
- 图像传感器
- 视频传感器
- 距离传感器
- 压力传感器
- 测速传感器
- 触觉传感器
- …



三维数据：第四代数字媒体（信息）

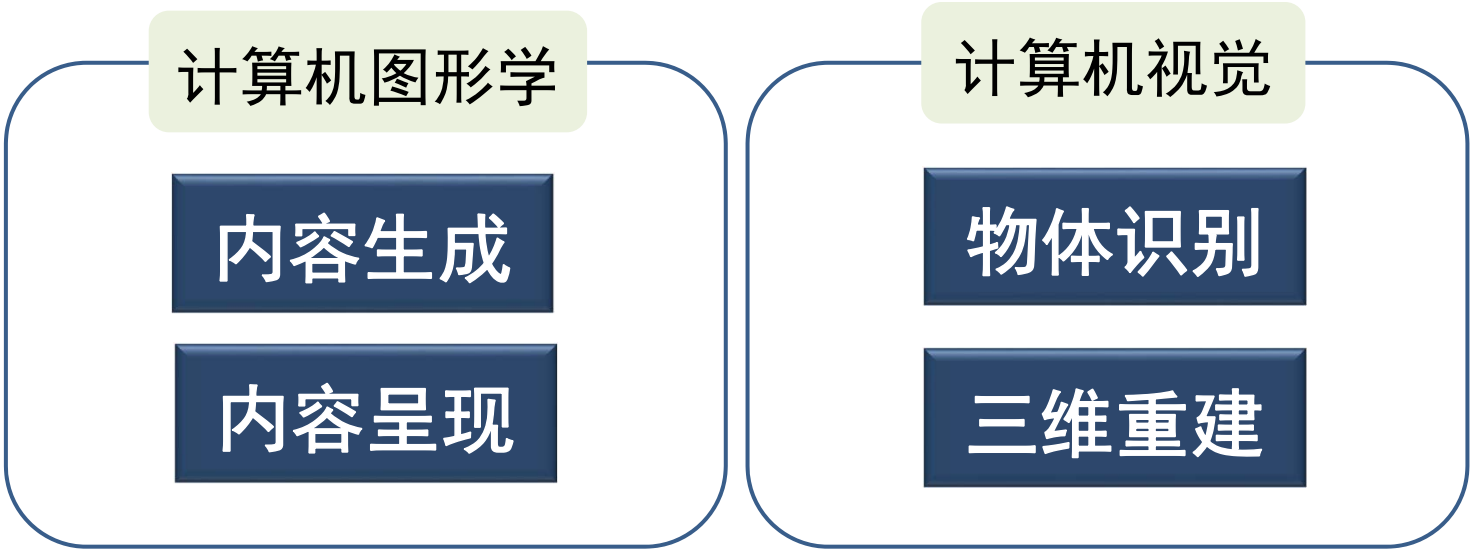


从感知到认知

感知设备	获取数据	研究领域
录音设备	语音	自然语言处理
照相机	图像	计算机视觉
摄像机	视频	视频处理
三维摄像头	 三维点云	计算机图形学

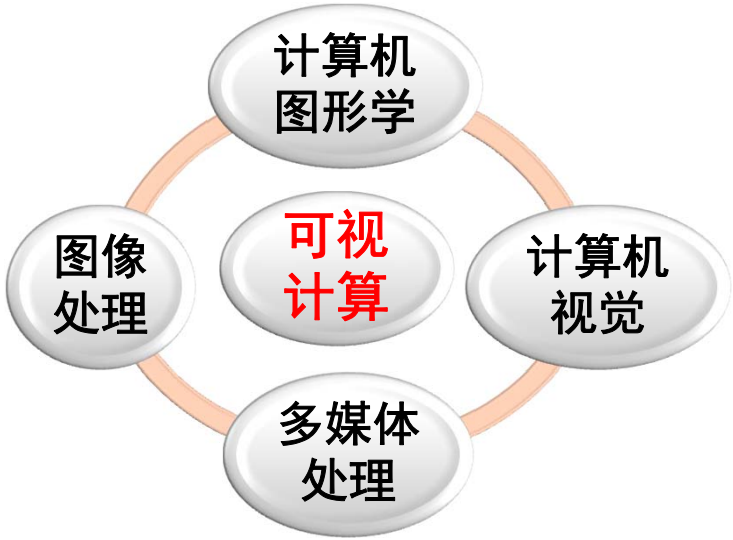
三维信息的必要性

- 三维数据是世界的直观表达
- 与计算机视觉的结合与互补



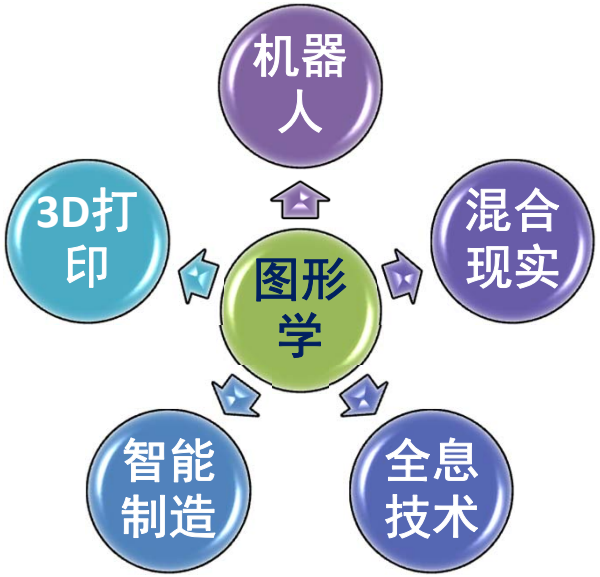
计算机图形学的变化和发展

“输入、输出、目标”都在变化和发展



学科融合

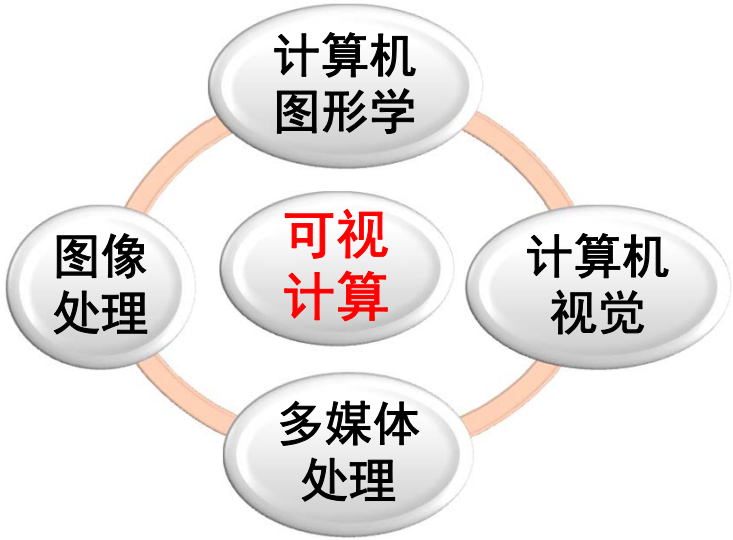
内涵：支撑技术



外延：产业应用

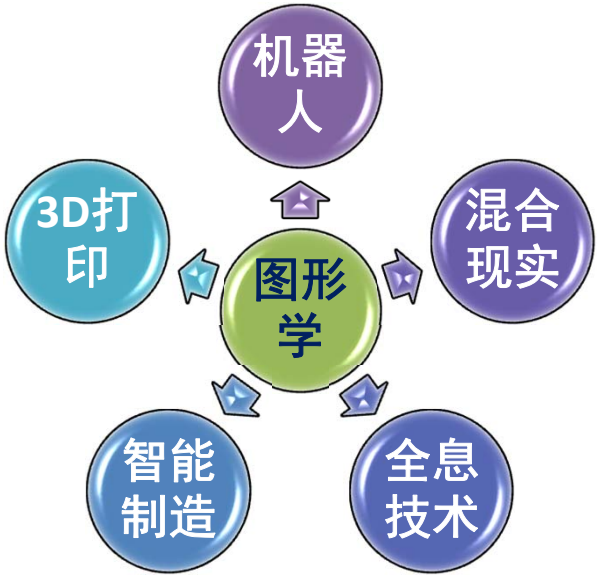
计算机图形学的变化和发展

“输入、输出、目标”都在变化和发展



学科融合

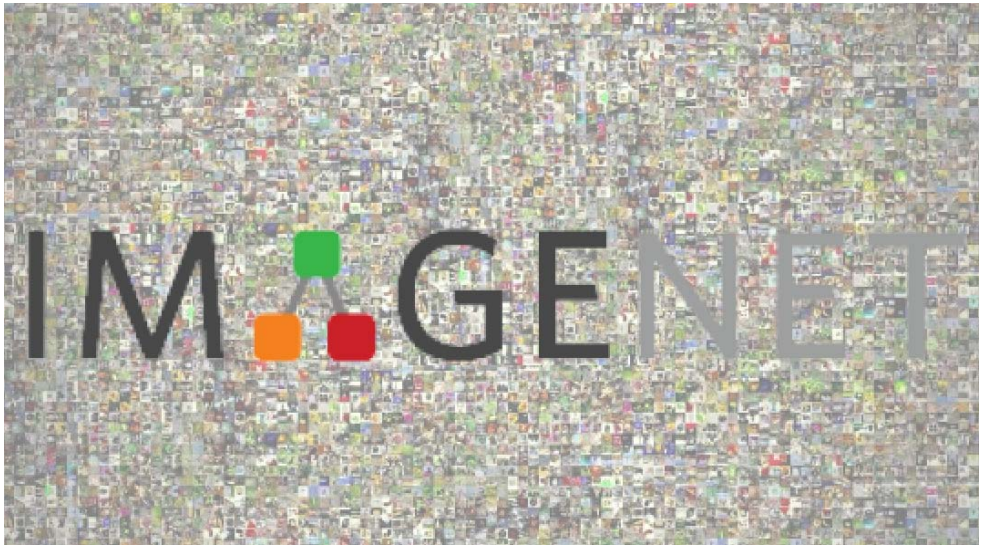
内涵：支撑技术



外延：产业应用

1. 3D内容的获取仍然是瓶颈

- 2D图像的获取容易
  - 获取方式简便：相机、手机
  - 互联网应用多：照片共享、社交
- 图像大数据催生落地应用（深度学习）
  - 人脸识别、车牌识别
  - 其他图像识别

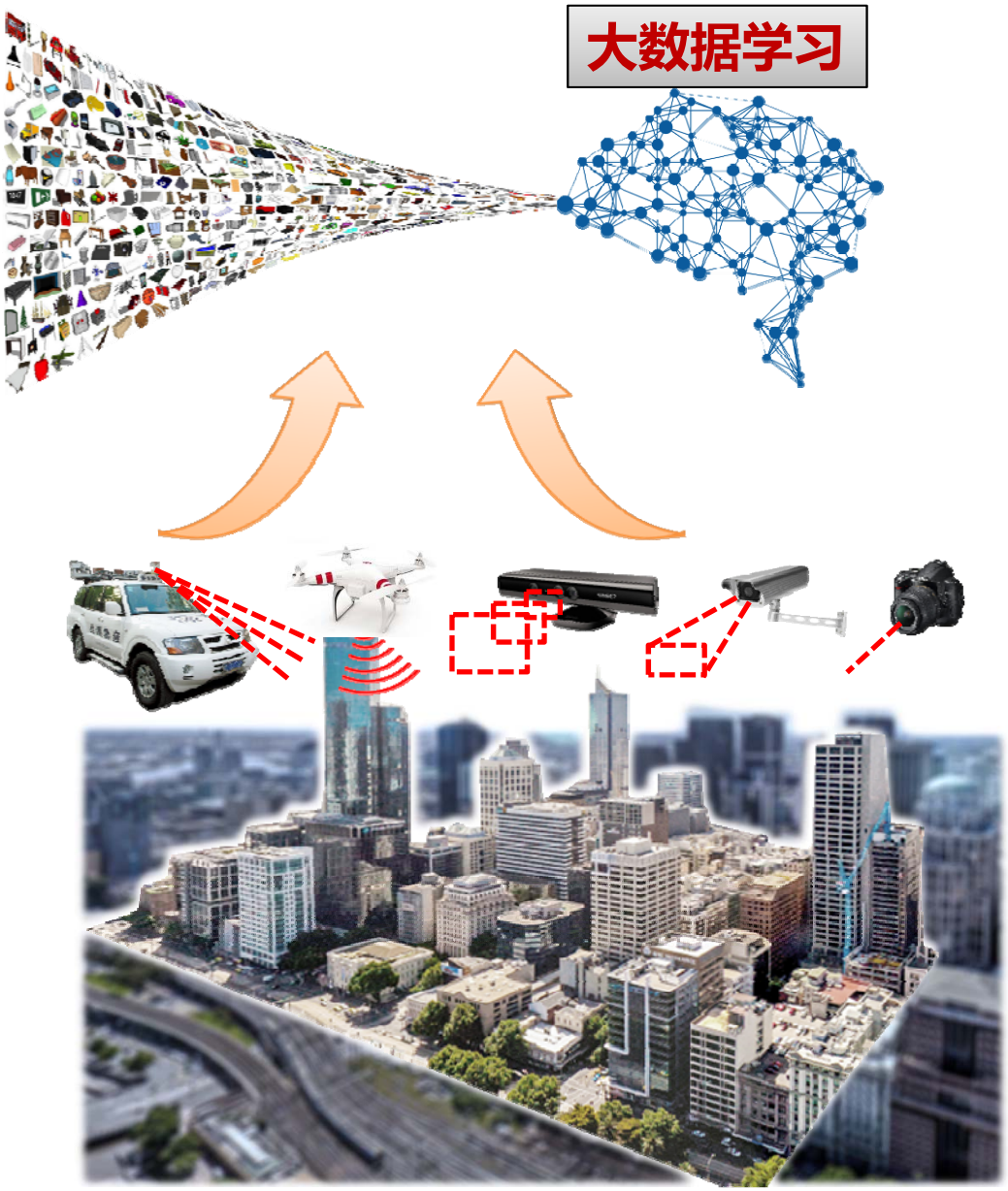


1. 3D内容的获取仍然是瓶颈

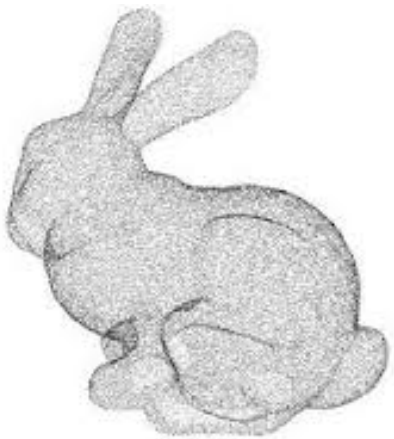
- 获取手段
  - 逐渐多样和容易
- 重建
  - 速度和质量仍须提高
  - 数据压缩
- 应用
  - 刚需应用？
  - 3D模型社交？
  - 3D模型大数据？

- Microsoft Kinect
- Intel RealSense
- Google Project Tango
- Apple Primesense
- Asus Xtion
- LEAP Motion
- Structure.io
- Stereo Cameras
- iPhone X

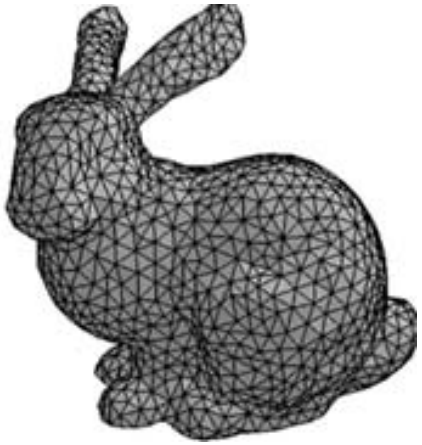
2. 三维数据及多模态数据的智能处理



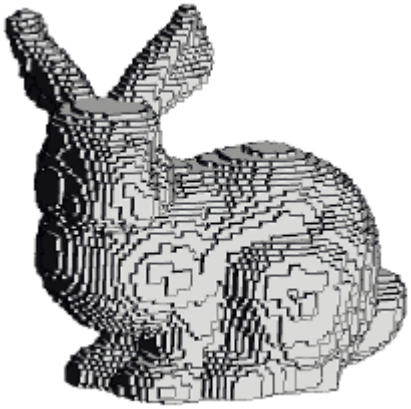
三维几何数据的不同表达



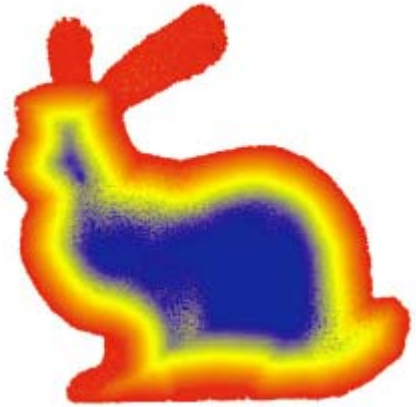
点云



网格

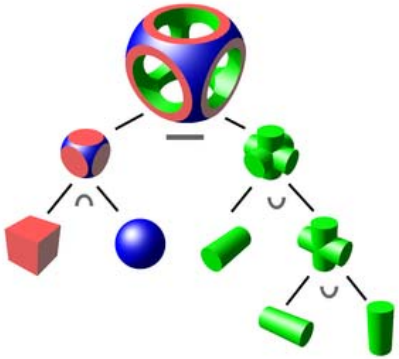


体素

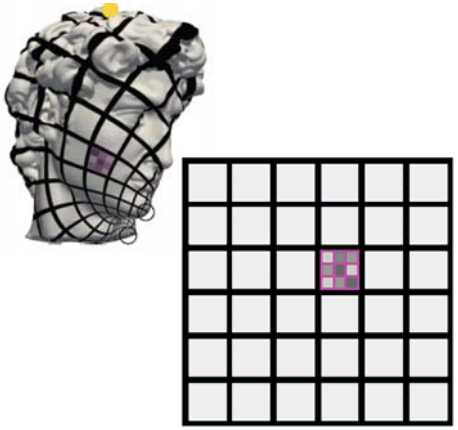


距离场

函数



组合结构

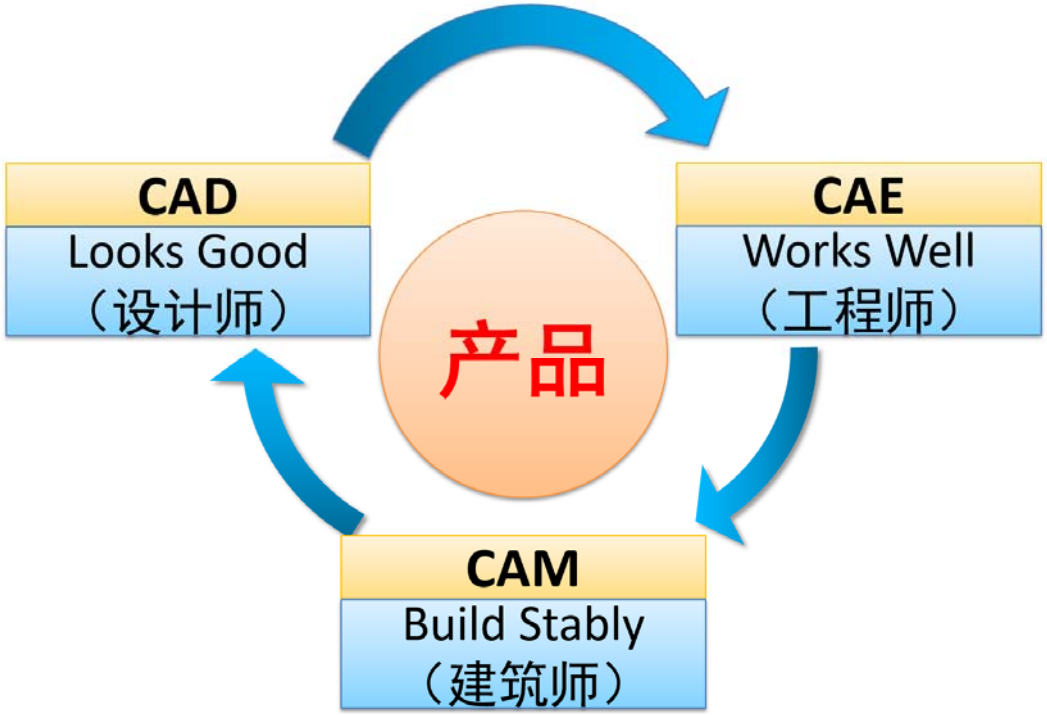


参数域图像

多视点图像

3. CAD/CAE/CAM一体化

- IGA, BIM/CIM



3D打印使广大研究者在该方向上研究成为可能

- **降低了制造的门槛：方便验证**
- **设计和制造任意复杂的几何结构**

4. 5G到来后的机遇

- 能够实时传输大量的3D数据
  - 低延迟？
- 催生潜在应用？
  - VR/AR
  - Holoportation
  - Telepresence（远程呈现）
  - 无人驾驶/机器人
  - 物联网
  - …

5. 孪生城市/智慧城市

- 3D数字城市是基础承载平台及可视化平台

6. 混合现实（与其他数据的融合）

- 狭义的虚拟现实：视觉呈现
- 广义的虚拟现实：与其他物联网数据（传感数据、信息数据、业务数据等）的深度融合与耦合

7. 云渲染→云图形学

- 云计算/雾计算/边缘计算
- 实时高质量渲染服务：移动端应用

提纲

- 计算机图形学：缘起
- 计算机图形学的主要内容
- 计算机图形学的应用
- 计算机图形学的问题与挑战
- 计算机图形学的发展与机遇
- 总结

总结

- 计算机图形学有巨大的应用潜力
- 计算机图形学仍有大量的问题未能解决
  - 入门难、挑战大
- 机遇与挑战

广阔天地, 大有所为!

Have fun!

中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

谢 谢 ！