



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

计算机图形学

Computer Graphics

陈仁杰

renjiec@ustc.edu.cn

<http://staff.ustc.edu.cn/~renjiec>

动画

- 通过连续播放一系列画面，给人的视觉造成连续变化的效果



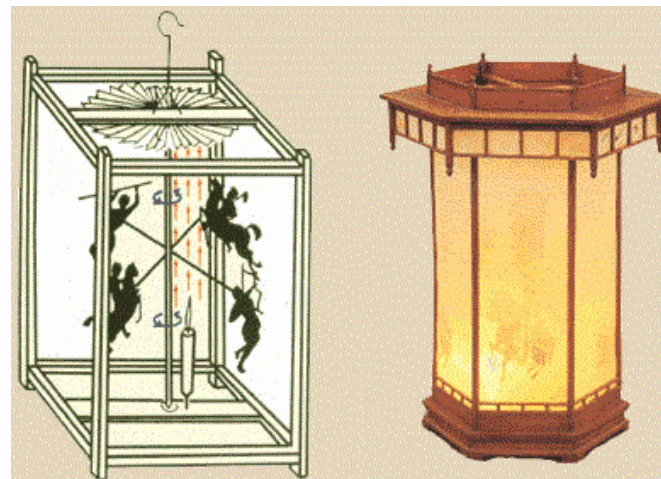
动画原理

- 视觉暂留原理

- 在人的研究看到一幅画或一个物体后，大约在0.05~0.1秒内不会消失

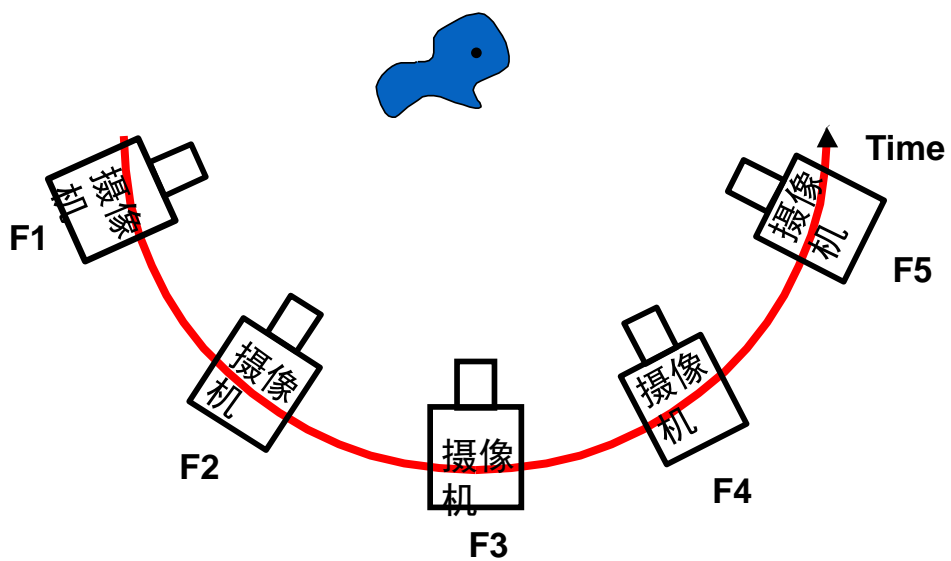
- 单位

- 每幅画称为一帧
- 每秒钟的帧数表示动画播放速度

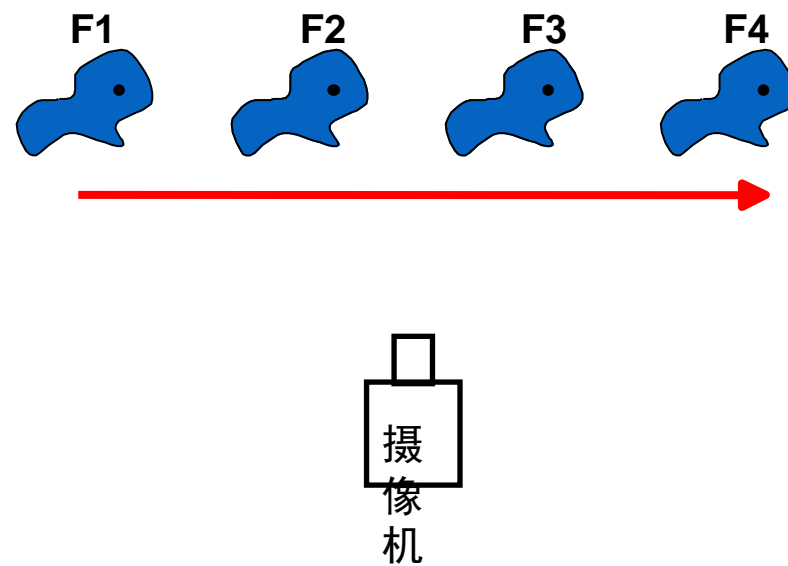


传统动画

- 动画是运动中的艺术



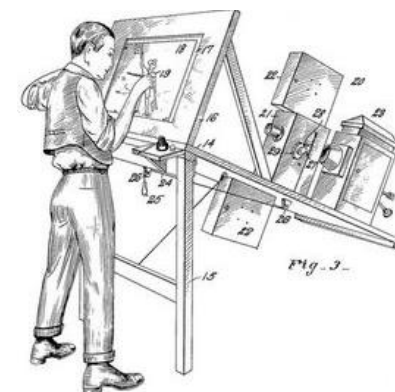
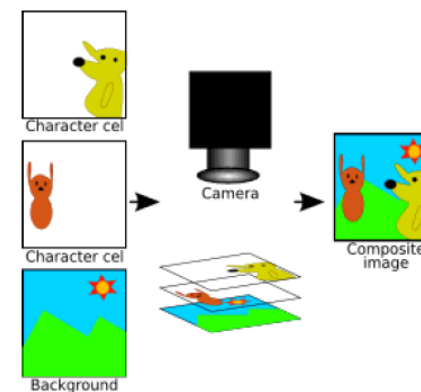
物体静止，摄像机运动



摄像机静止，物体运动

传统动画

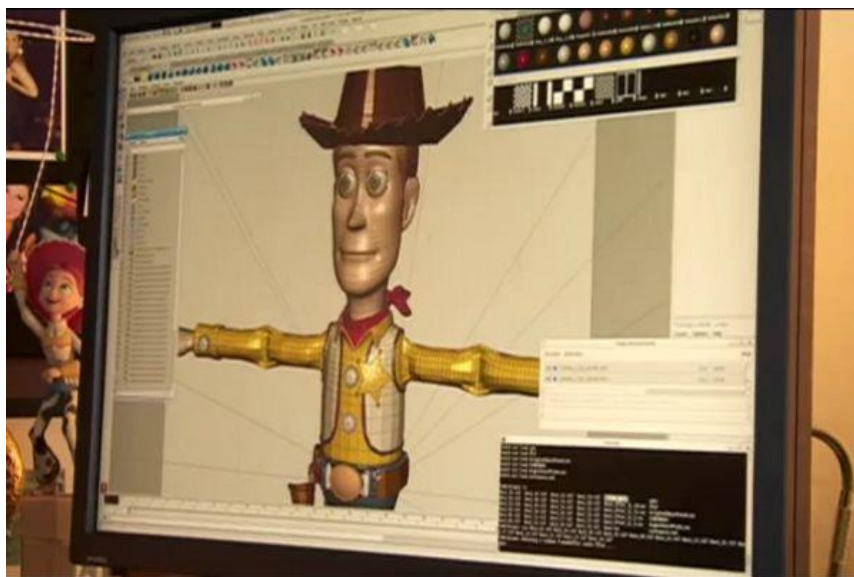
- 逐帧手绘画面
 - 创作灵活性大，但费时费力
- 采用分层技术制作 (cel animation, 1914)
 - 关键帧
 - 过渡、融合
- 影像描摹(Rotoscoping, 1915)
 - 描绘实拍影片的运动



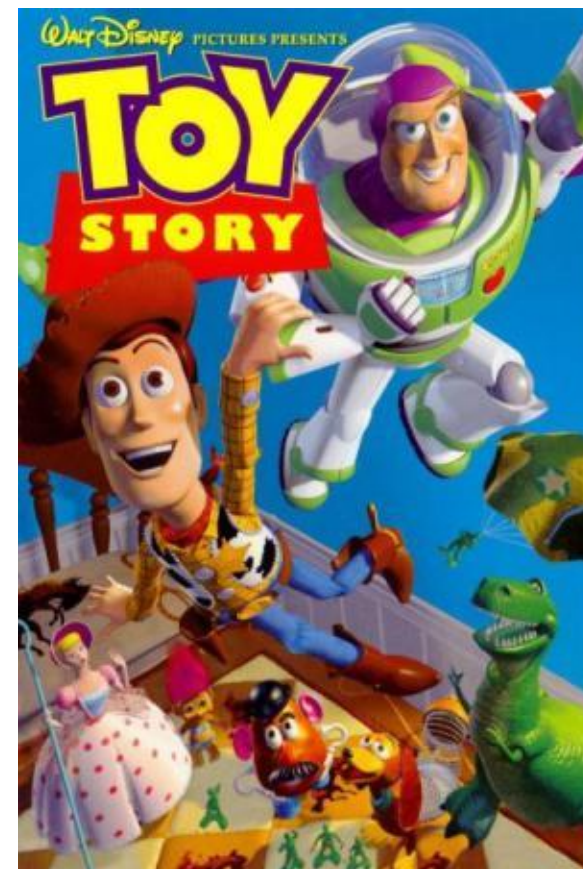
计算机动画

采用图形与图像的处理技术，借助于编程或动画制作软件生成一系列的画

- 通过连续播放静止图像的方法产生物体运动的效果



Computer



计算机动画形式

- 物体位置、方向、大小和形状的变化
- 虚拟摄像机的运动
- 物体表面纹理、色彩的变化



计算机动画发展历史

- **计算机图形学之前 (1940s~mid-1960s)**

- 1950s, 通过模拟信号的电子计算机进行光线和物体控制, 生成运动的画面
- 1957年, Russell Kirsch等在数字计算机上扫描照片生成画面

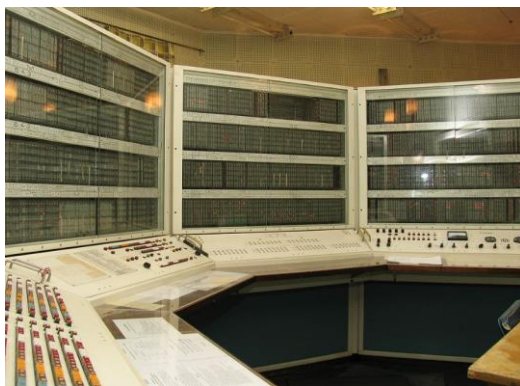


1957年, SEAC扫描第一张数字图像

计算机动画发展历史

• 早期2D (mid-1960s~mid-1970s)

- 1964年, Ivan Surtherlands发明SketchPad
- 1968年, 苏联人在BESM计算机上创作了第一个计算机动画角色: 行走的猫
- 1973年, 美国米高梅公司发行第一部采用计算机动画处理的电影Westworld



BESM



Westworld



计算机动画发展历史

• 中期3D (mid-1970s~1980s)

- 1972年，影片Futureworld中使用了3D线框模型制作画面，成为最早的3D计算机动画电影
- 1975年，第二部使用3D线框动画短片Great获奥斯卡奖
- 1977年，第三部使用类似动画技术的影片是星球大战



Futureworld



Great



StarWars

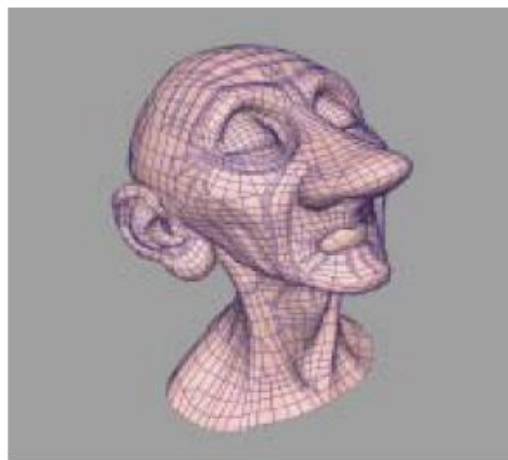
计算机动画发展历史

- 近期全3D（1990s~现在）

- 1995年，Pixar公司玩具总动员，是首部完全使用电脑动画技术的动画长篇
- 1998年，Pixar公司动画短片电影Geri's Game获奥斯卡最佳短片奖



Toy's story



Geri's game



传统动画应用于计算机动画的基本原则

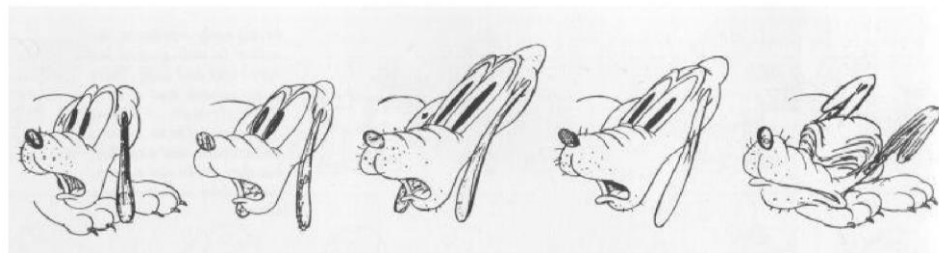
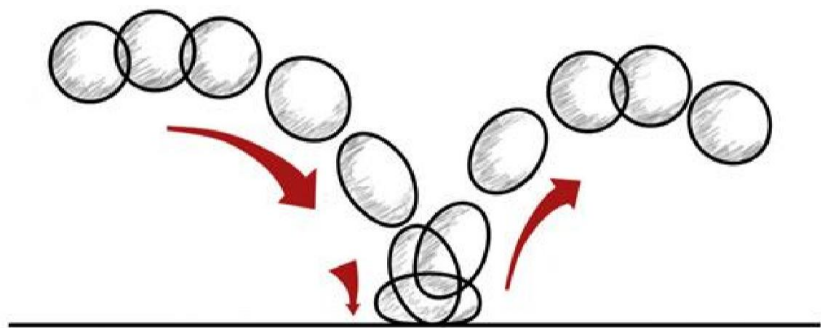
- ✓ Squash and stretch
- ✓ Anticipation
- ✓ Staging
- ✓ Straight-ahead action and pose-to-pose action
- ✓ Follow-through and overlapping action
- ✓ Slow in and slow out
- ✓ Arcs
- ✓ Secondary action
- ✓ Timing
- ✓ Exaggeration
- ✓ Solid drawing
- ✓ Appeal
- ✓ Depth of field
- ✓ Balance and weight



John Lasseter, “Principles of traditional animation applied to 3D computer animation”. Computer Graphics, 1987.

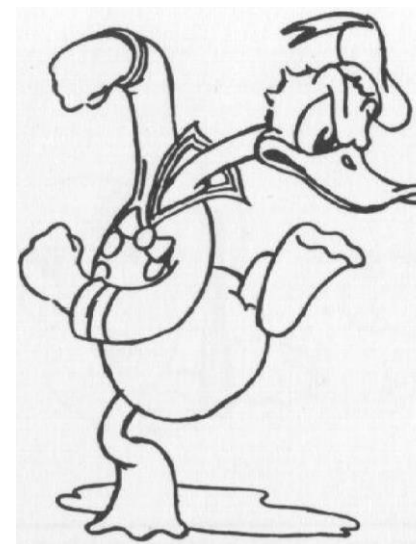
Squash and stretch (挤压和伸展)

- 通过物体的形变来表现物体的刚度和质量：保持体积
- 最显著的应用是肌肉的变形
- 蕴含的物理原理：影响运动的因素包括质量、外力、材料属性、表面接触的位置等



Anticipation (预期性)

- 动画中的动作通常包括动作的准备、实际的动作和动作的完成三部分。第一部分就叫做预期性。



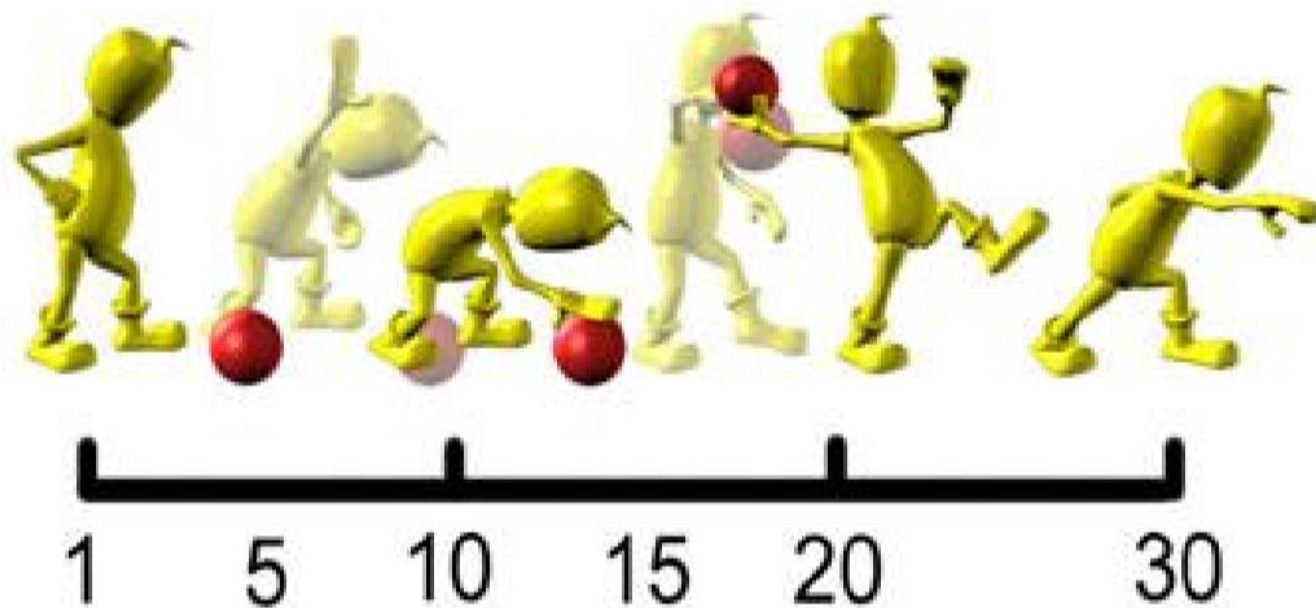
Staging (布局)

- 以一种容易理解的方式展示动作或对象
- 角色的仪态及表演方式，配合适当的摄影机运动，使得动画能有效地表达角色的特性及故事中的信息



Straight-ahead action and pose-to-pose action (连贯动作法与关键动作法)

- 连贯动作法：根据连续的动作依序制作每一帧画面
- 关键动作法：是先定义关键的主要动作，而后再制作关键动作间的画面（关键帧方法）



Follow-through and overlapping action (跟随动作与重叠动作)

- “动者恒动”：没有任何一种物体会突然停止，物体的运动是一个部分接着一个部分的



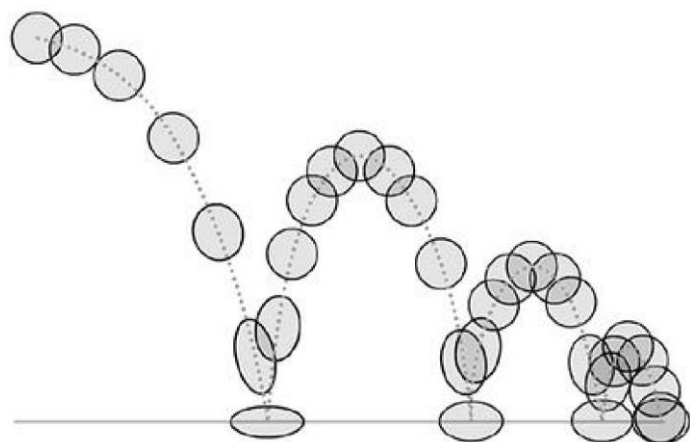
《冰川时代》



《汽车总动员》

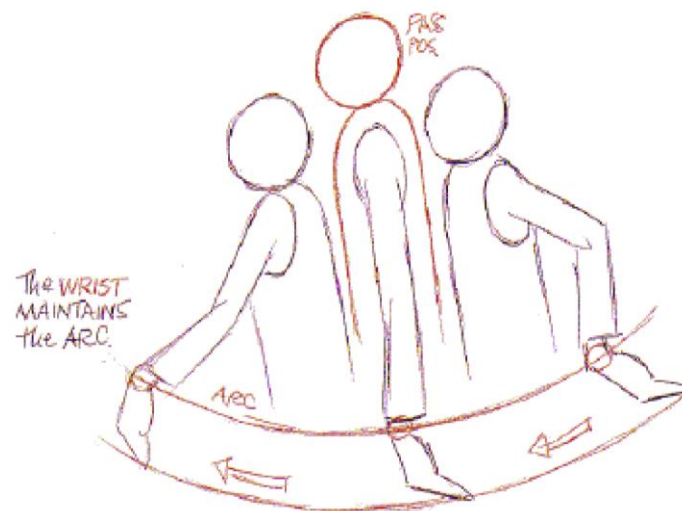
Slow in and slow out (慢入和慢出)

- 动作的加速和减速：自然界中物体的运动具有加速和减速的性质
- 动作的慢入和慢出使得物体的运动更加符合自然规律，因此应该应用于绝大多数的动作



Arcs (弧形动作)

- 现实世界中，几乎所有的运动都是沿着一条略带圆弧的轨道移动的，尤其是生物的运动。
- 因此，在制作动画时，角色的运动轨迹就不应是直线，而应该都是比较自然的曲线



Secondary action (附属运动)

- 角色进行主要动作时，附属于角色的部分，例如触须、尾巴等，会以附属动作来点缀主要动作的效果
- 为动画增添乐趣和真实性



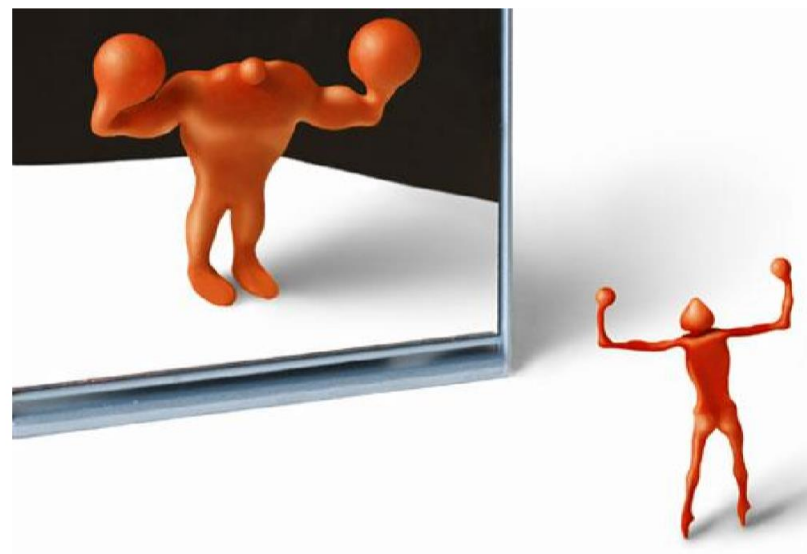
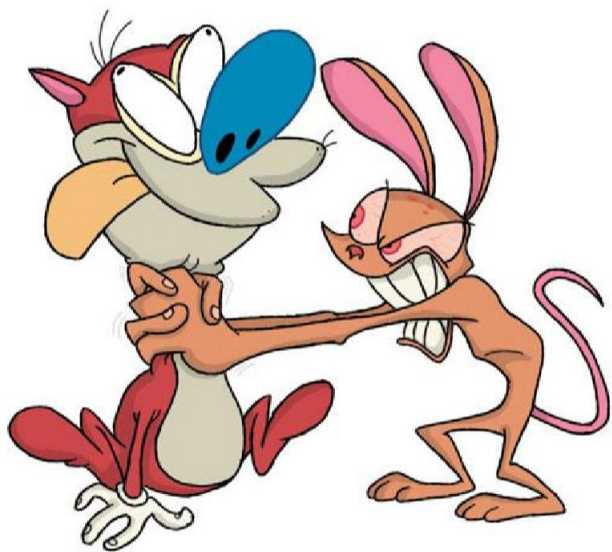
Timing (掌握时序)

- 时间的调配和选择是影响动画效果的最关键因素之一
- 通过时序来表现物体的大小、重量和个性



Exaggeration (夸张)

- 用于强调某个动作，使动画更加有趣

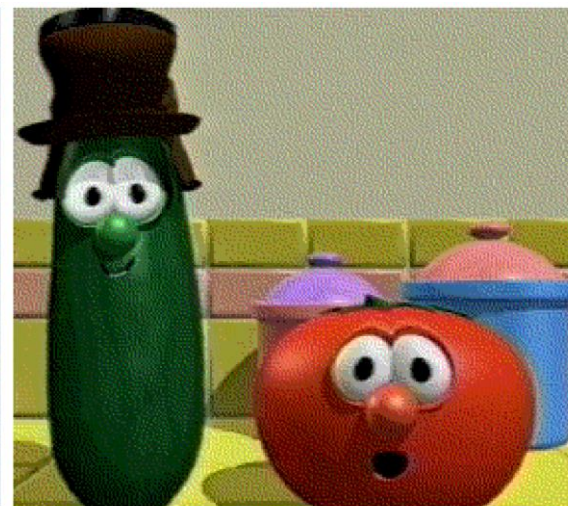


Appeal (吸引力)

- 任何观众愿意观看的东西，以表现出角色的个性
- 建立角色与观众的某种联系，以独特的造型或姿态来提高观众对角色的印象



Bad appeal

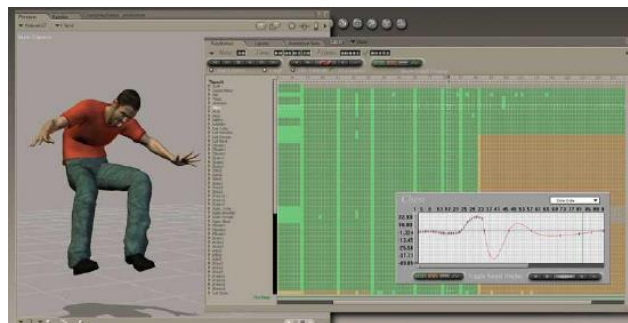
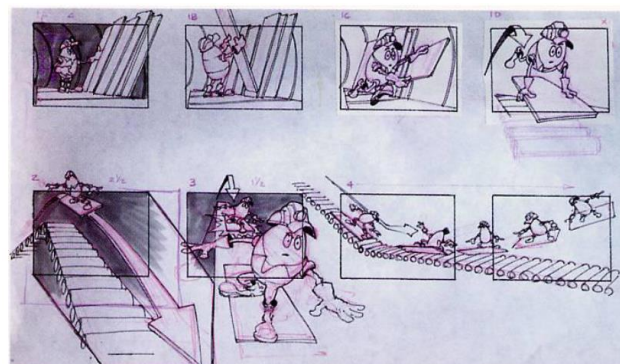


Good appeal

动画制作

动画制作流程

- 故事展板 (storyboard)
- 角色造型 (model sheet)
- 关键帧和过渡
(key frames & in-betweening)
- 镜头测试 (test shots)
- 上色 (inking)
- 声音
 - 配乐
 - 特效
 - 配音



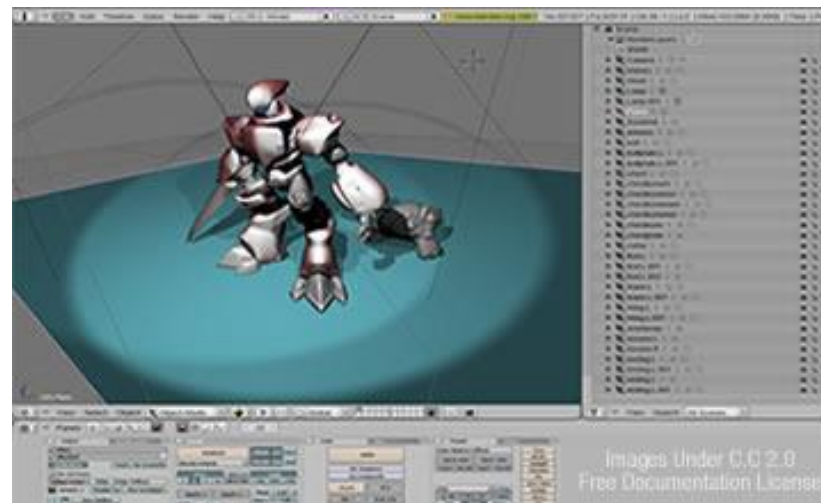
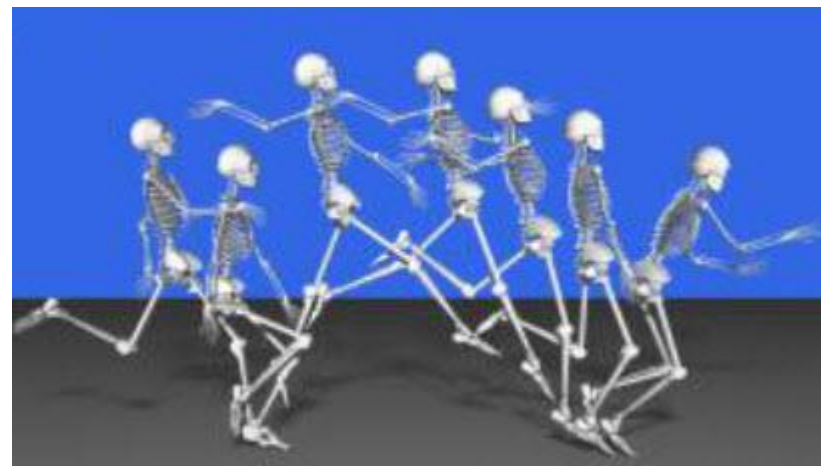
计算机动画制作

- **关键帧和过渡**

- 动画师制作关键帧，由计算机编程生成中间过渡的帧

- **镜头测试和上色**

- 通过计算机局部变形生成镜头内容
- 各种图形学绘制进行上色



计算机动画制作技术

① 关键帧技术

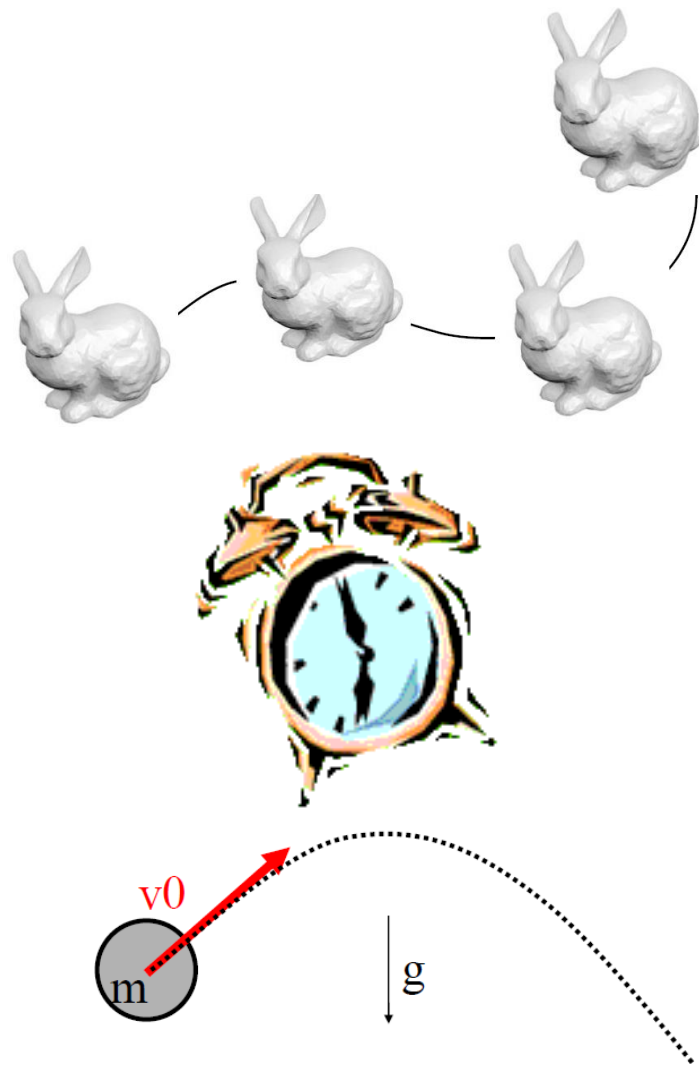
- 指定若干时刻的姿态，自动生成中间状态

② 过程建模

- 通过改变若干参数，生成新的动画

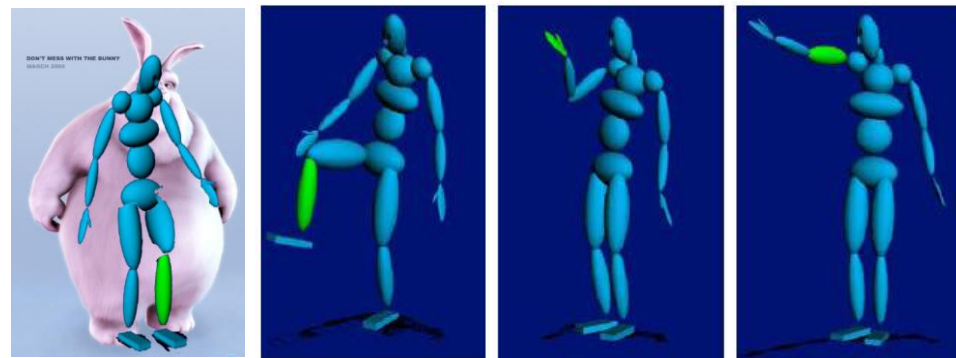
③ 物理模拟

- 赋予物体物理属性（质量、外力等）
- 根据物理定律模拟运动状态



计算机动画制作控制技术

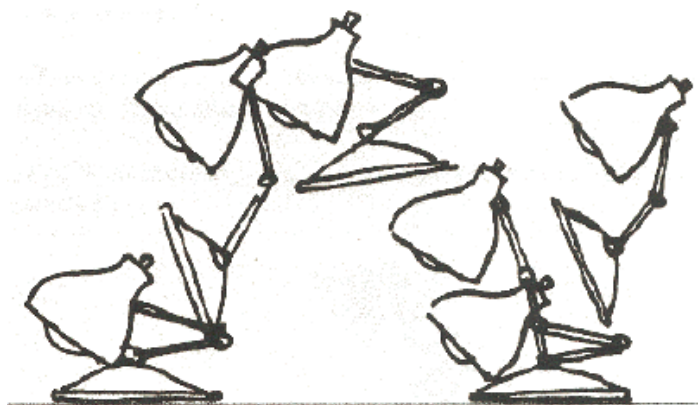
- **骨架驱动：**采用物体简化的低维模型作为骨架，驱动原始物体的动画运动
 - 前向动力学
 - 反向动力学
- **运动捕捉：**利用传感器记录外界运动，作用到物体上生成相应动画



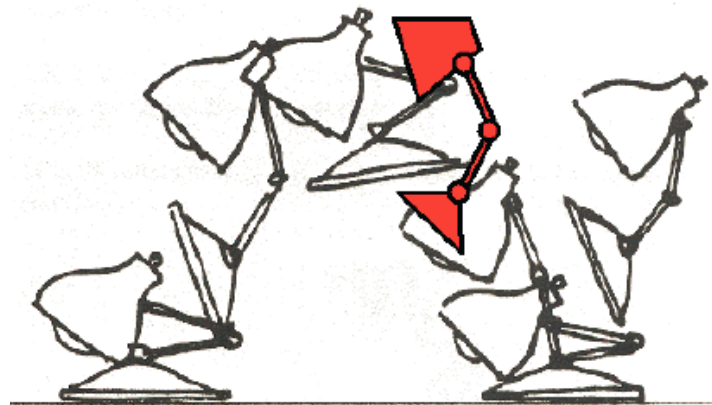
关键帧插值

关键帧概念

- 动画序列中对象特定时刻形态的关键画面
 - 例如动作的起始和终止画面
 - 通过关键帧之间的插值形成连贯动画序列
- 源于早期Walt Disney卡通画的制作



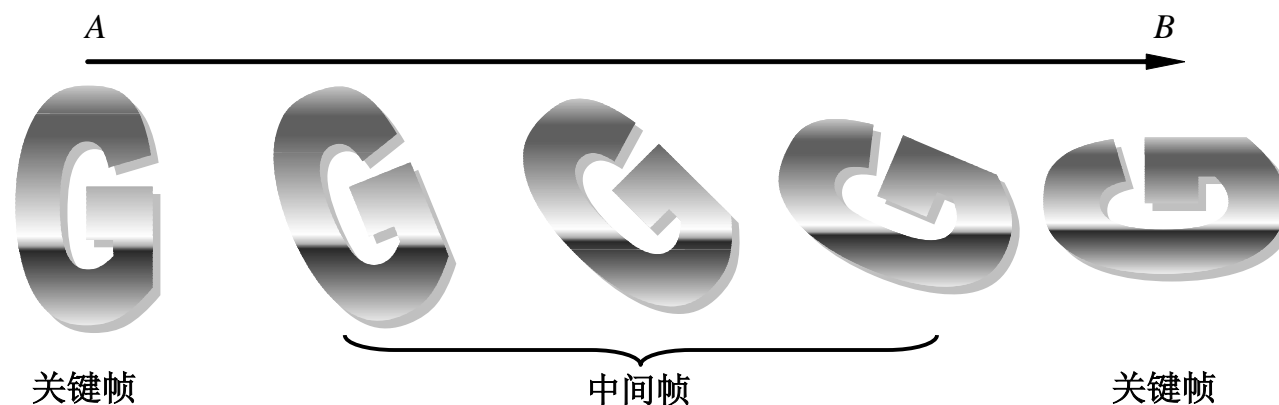
关键帧



中间插值

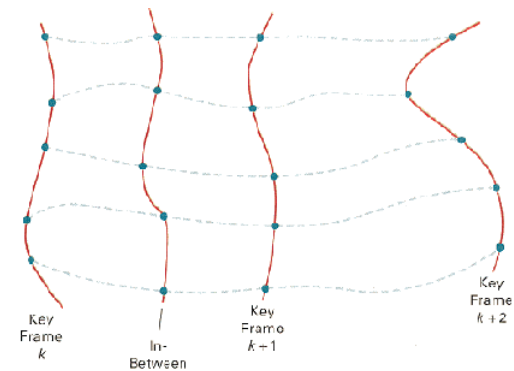
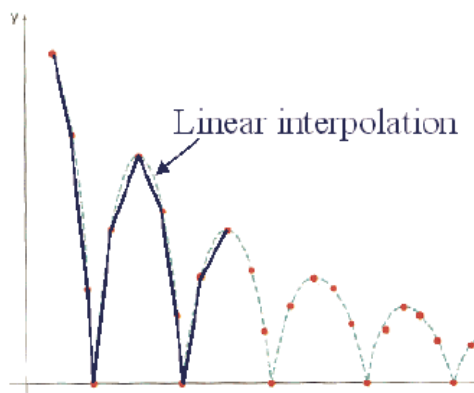
关键帧技术

- 在早期的动画制作室，高级动画师设计卡通片中的关键帧，然后由助理动画师设计中间帧
- 关键帧技术最初仅仅用来插值帧与帧之间卡通画的形状，不久该技术发展成为可以用来插值影响运动的任何参数



关键帧插值

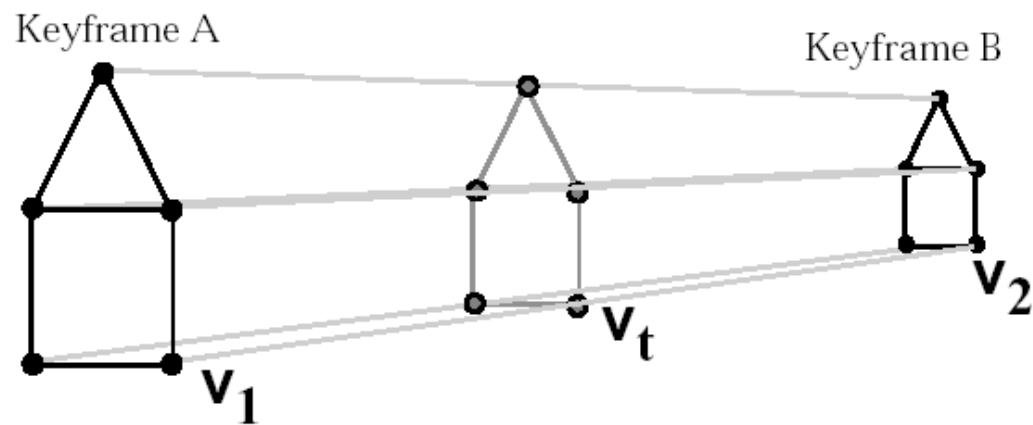
- 在关键帧之间生成连续变化的中间画面
- 插值参数域
 - 颜色 (溶解)
 - 形状 (形变)
- 插值连续性
 - 线性插值
 - 样条插值



线性插值

- 给定一个物体在两个关键帧上的顶点 v_1 和 v_2
- 在 t 时刻的顶点 v_t 可以用如下公式计算

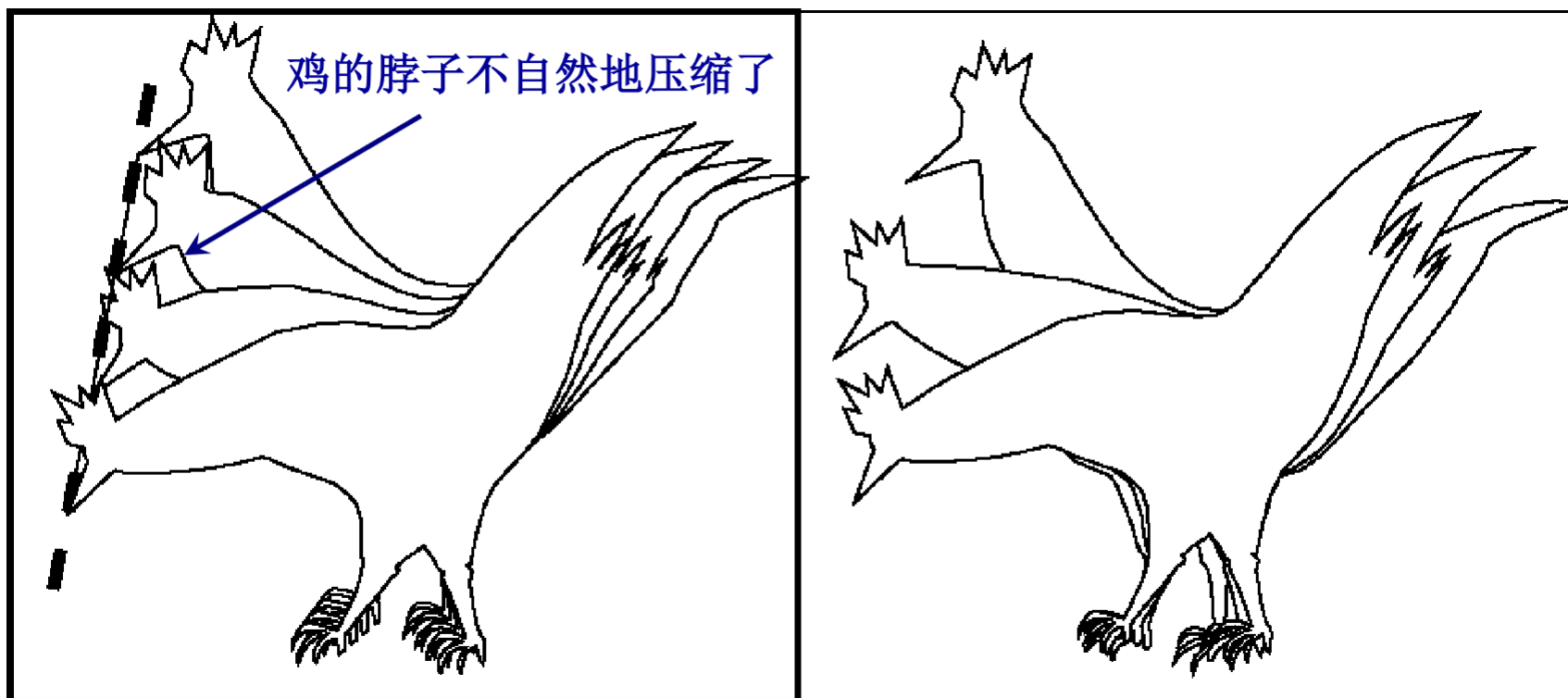
$$v_t = (1-t)v_1 + tv_2$$



- 不真实
- 大部分物体不是以直线运动的
- 大部分运动随时间不是线性的
- **位置连续，但是速度不连续！**

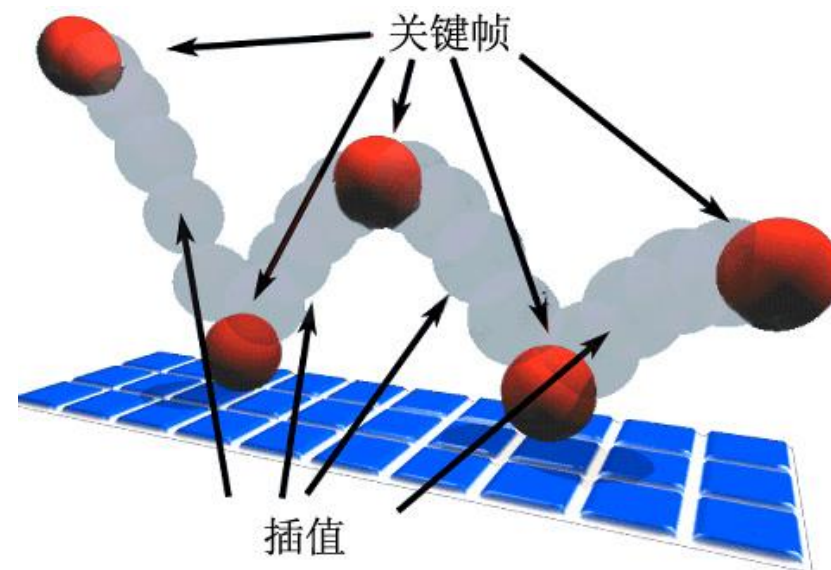
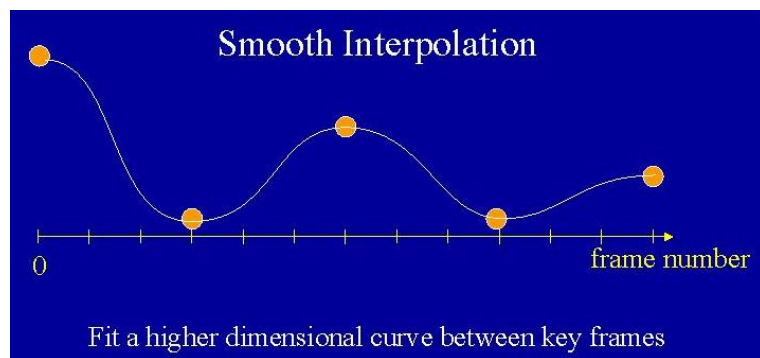
线性插值

- 收缩 (Shrinkage) 和扭结 (Kink) 现象



样条插值

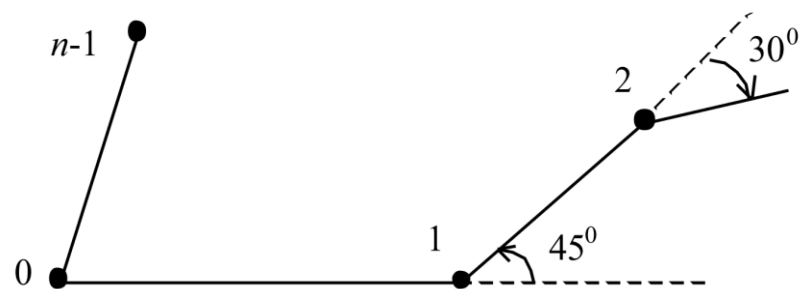
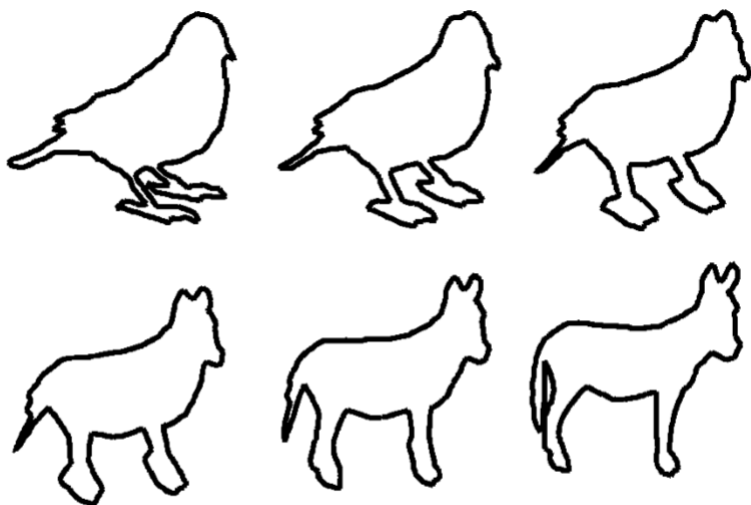
- 用户先设计好物体运动轨迹的关键位置点
- 利用样条曲线进行拟合
 - Hermite曲线
 - Bezier曲线
 - Catmull-Rom曲线
 - B-splines, NURBS曲线



基于形变的插值方法

- 内在形状插值的多边形渐变

- 问题：给定起始和终止图像上的多边形作为关键帧形状，如何渐变的形状变化
- 思想：利用多边形的内在表示进行插值来产生形变



乌龟几何定义多边形

基于形变的插值方法

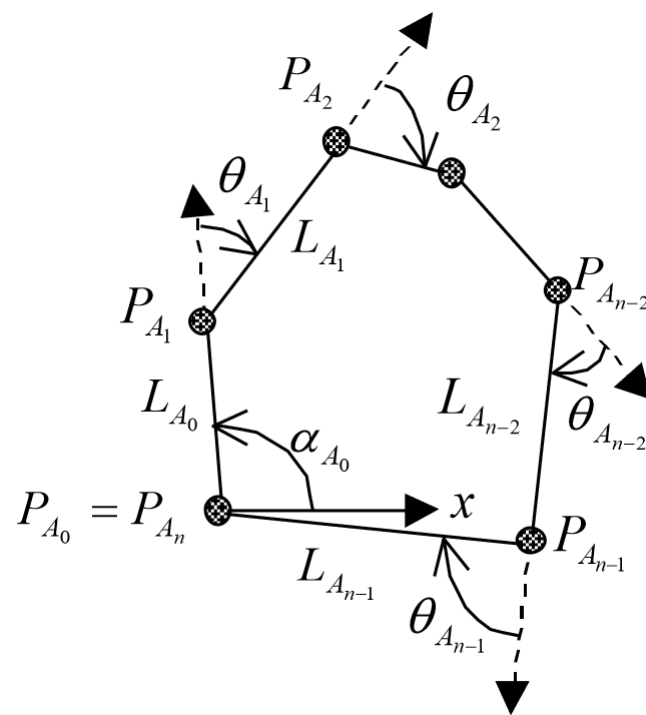
- 内在形状插值的多边形渐变
 - 乌龟几何定义多边形

$$\alpha_{A_0} = \theta(x, P_{A_0}, P_{A_1})$$

$$\theta_{A_i} = \theta(P_{A_{i-1}}, P_{A_i}, P_{A_{i+1}})$$

$$L_{A_i} = |P_{A_{i+1}} - P_{A_i}|$$

$$\{\alpha_0, L_0, (\theta_i, L_i)_{i=1}^m\}$$



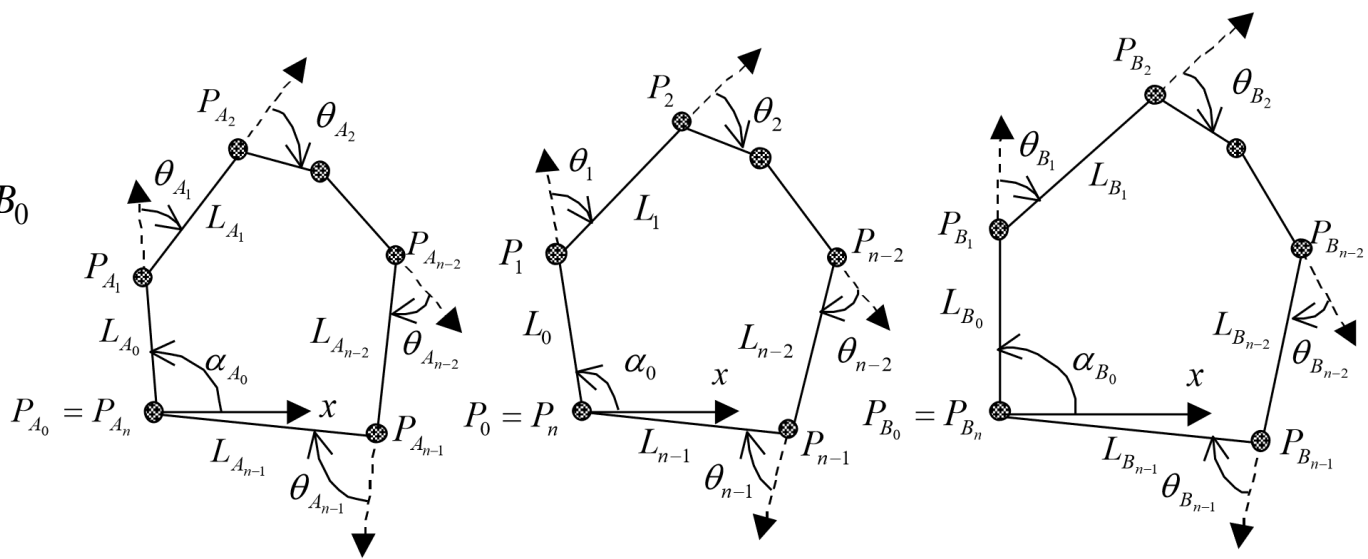
基于形变的插值方法

- 内在形状插值的多边形渐变
 - 乌龟几何定义多边形
 - 内在形状插值

$$\alpha_0 = (1-t)\alpha_{A_0} + t\alpha_{B_0}$$

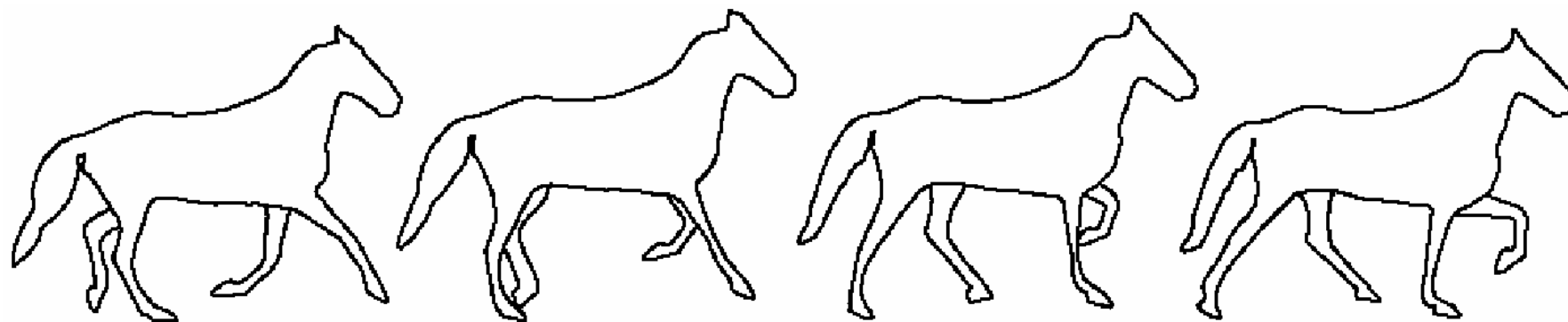
$$\theta_i = (1-t)\theta_{A_i} + t\theta_{B_i}$$

$$L_i = (1-t)L_{A_i} + tL_{B_i}$$



基于形变的插值方法

- 内在形状插值的多边形渐变
 - 结果



起始帧

结束帧

基于形变的插值方法

- 形状保持的图像形变插值

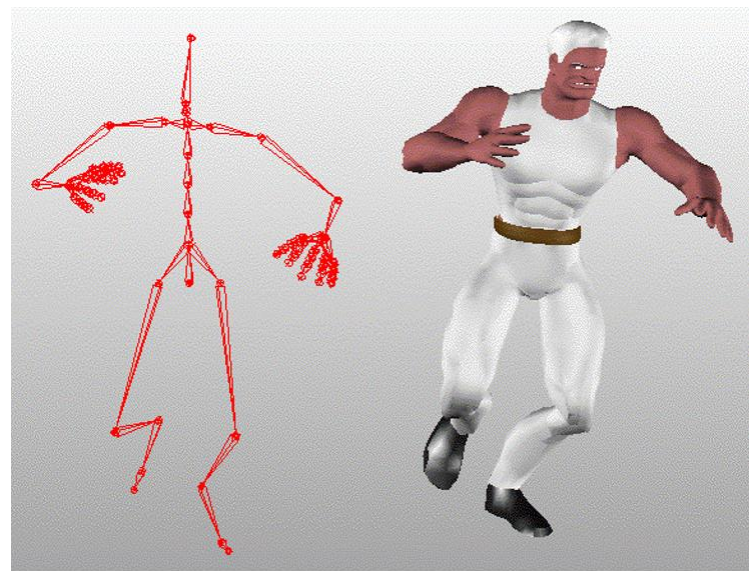
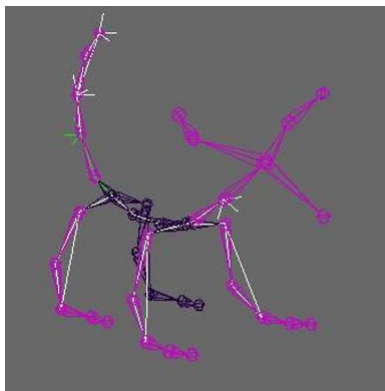
- 问题：给定起始和终止图像作为关键帧，如何在形变过程中尽可能保持形状较少改变
- 思想：利用平面形状的刚性变换进行形变
 - 刚性变换：保持度量（长度+角度）不变的几何变换



关节动画

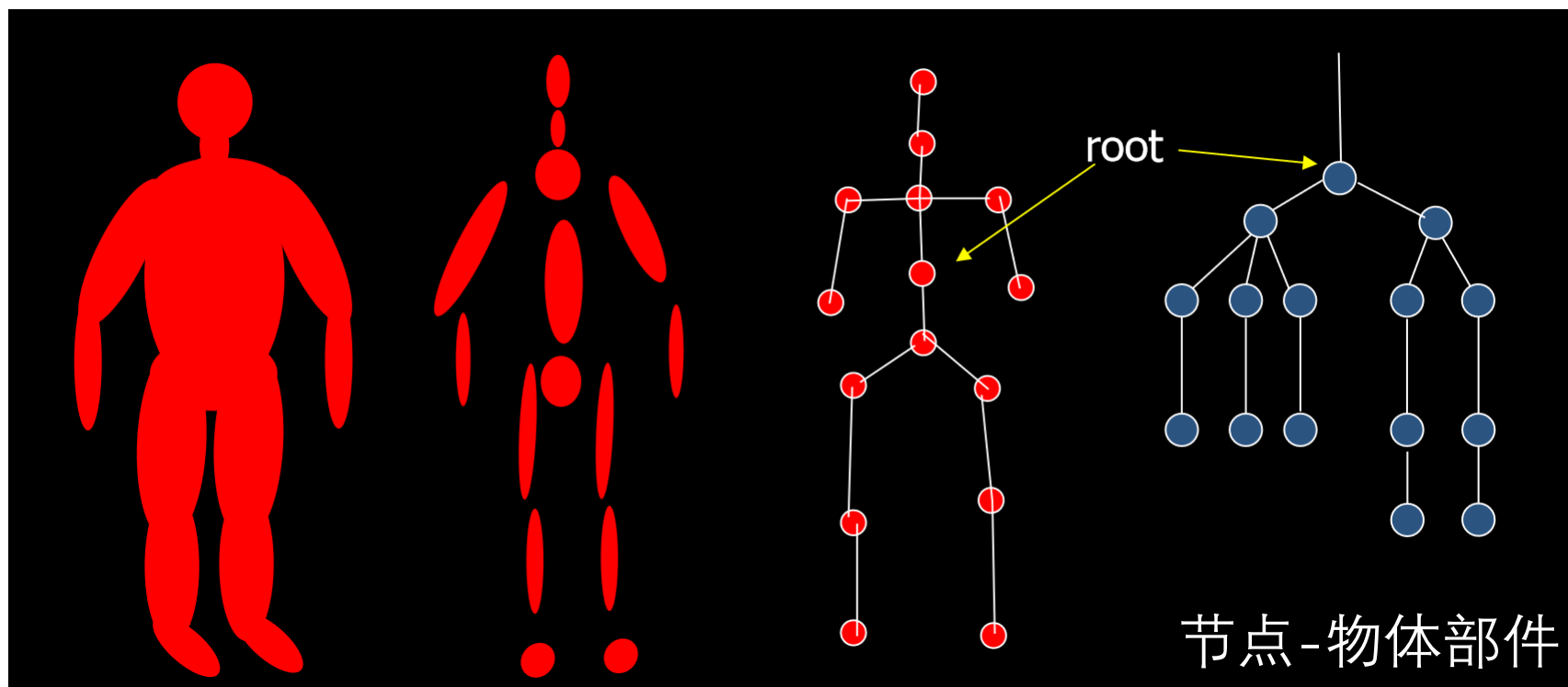
关节模型

- 人、动物等角色具有明显的关节特征，关节动画是实现这类角色动画不可缺少的部分。



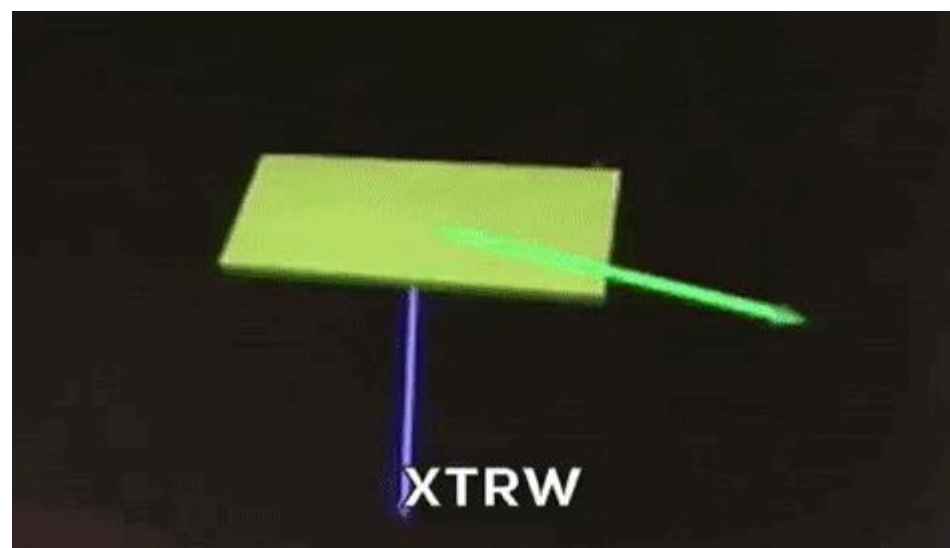
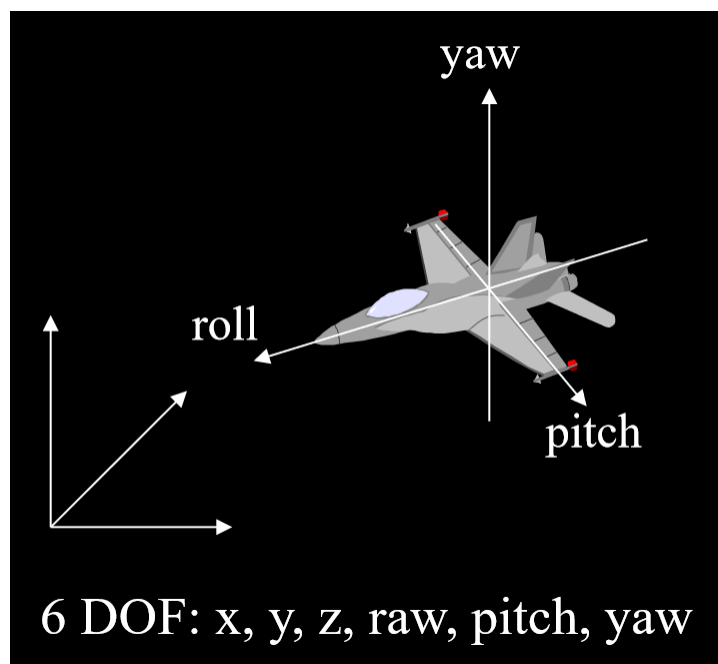
关节模型

- 把关节角色表示为一系列通过关节 (joints) 相连接的连杆 (links) 。



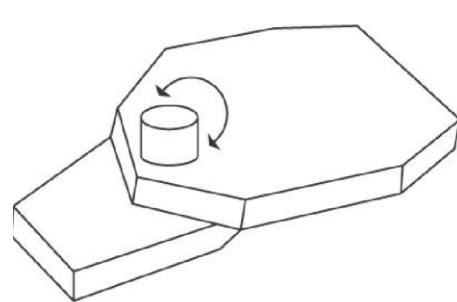
关节模型

- 自由度 (Degrees of Freedom, DOF)
 - 完全指定一个物体运动所需的最小坐标数目

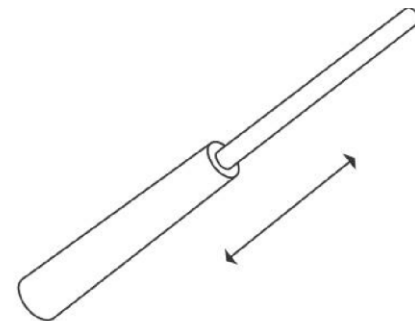


关节模型

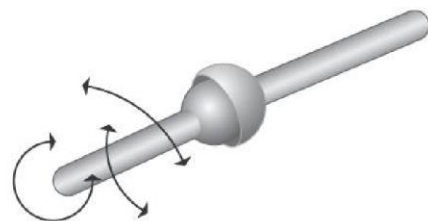
- 单自由度关节
 - 允许在一个方向运动
- 2自由度关节
- 3自由度关节
- n自由度关节



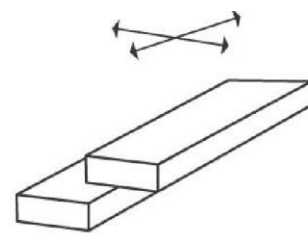
Revolute joint



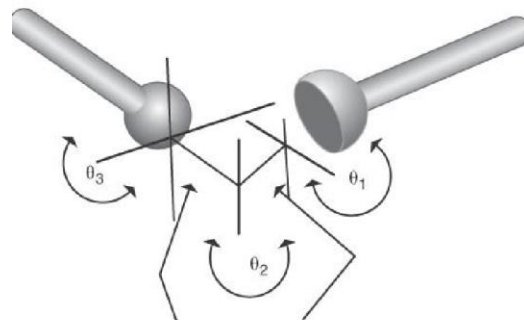
Prismatic joint



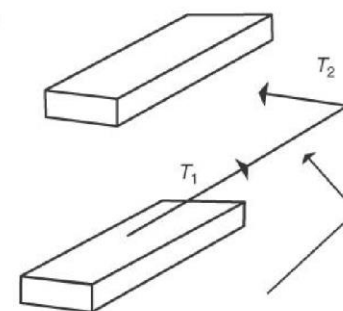
Ball-and-socket joint 球状关节



Planar joint 平面关节



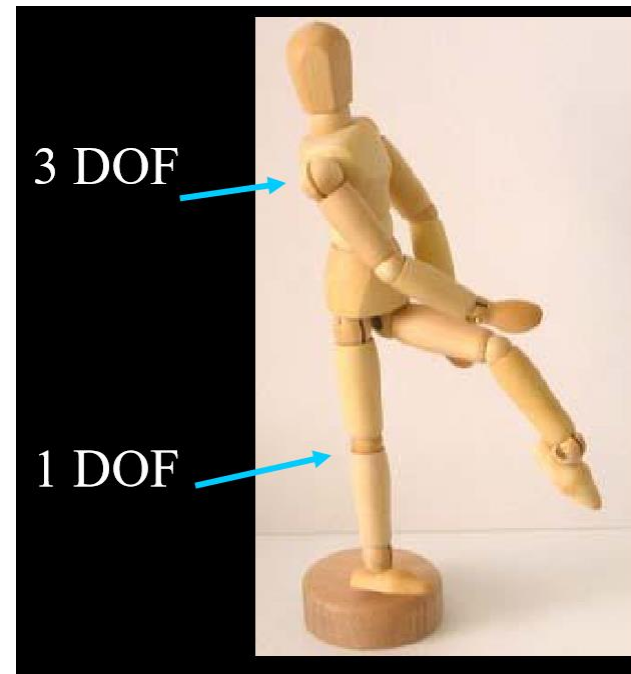
zero-length linkages



zero-length linkage

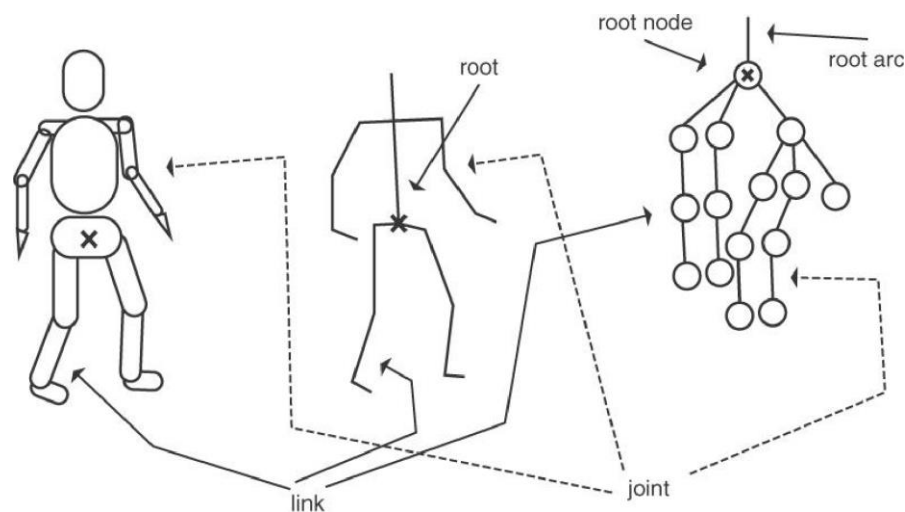
人体模型的自由度

- 根节点：3平移自由度+3旋转自由度
- 每个关节至多3个自由度
 - 肩关节
 - 腕关节
 - 膝关节



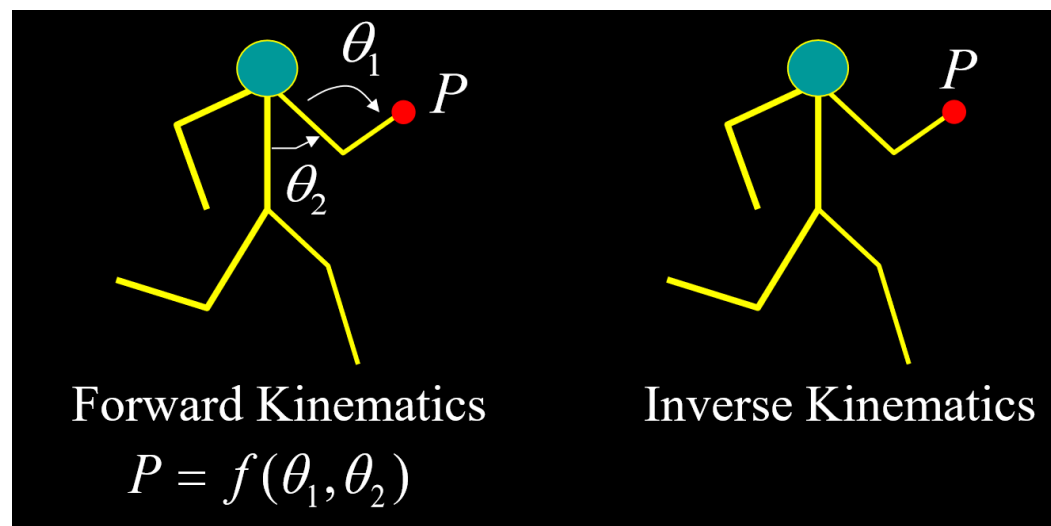
树状层次模型结构

- 节点：表示物体部件
 - 根节点：对应于物体的根部，其位置在世界坐标系中给出
 - 其它节点：相对于根节点来表示
- 连接弧：表示层次结构中应用于物体部件之间的关节或变换



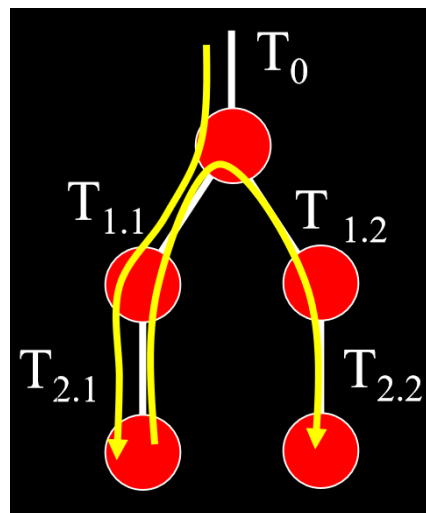
运动模型

- 正向运动学 (Forward kinematics)
 - 从关节空间映射到笛卡尔空间
- 反向运动学 (Inverse kinematics)
 - 从笛卡尔空间映射到关节空间



运动模型

- 正向运动学 (Forward kinematics)
 - 从根节点到叶节点进行深度优先遍历
 - 重复以下步骤，直到所有节点和连接弧都被访问过
 - 对树进行回溯，直到遇到一个未被访问过的向下连接弧
 - 对向下连接弧进行遍历



$$M=I$$

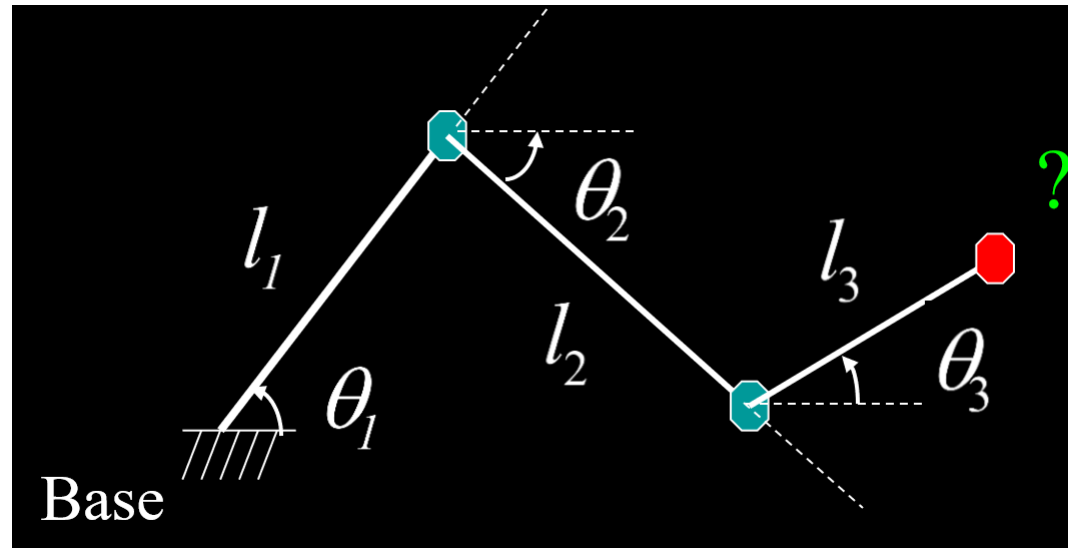
$$M=T_0$$

$$M=T_0 * T_{1.1}$$

$$M=T_0 * T_{1.1} * T_{2.1}$$

正向运动学 (Forward kinematics)

- 示例



$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_3)$$

反向运动学 (Inverse kinematics)

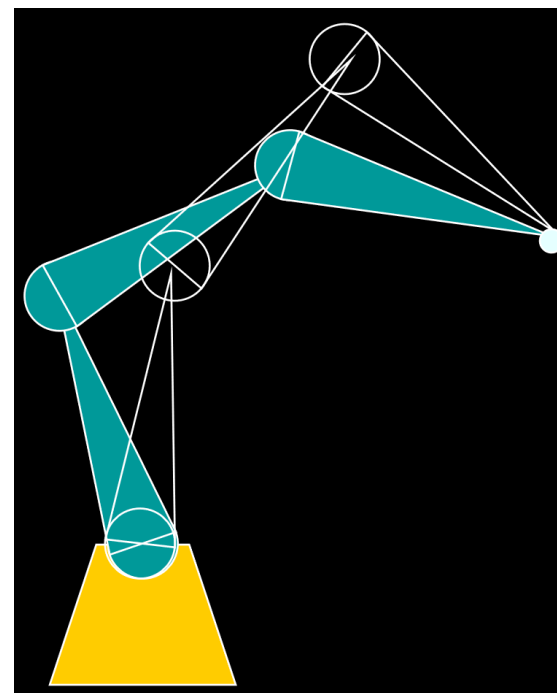
- 给定初始姿态向量和目标姿态向量，计算关节向量的值，使得物体满足所需的姿势

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) + l_3 \cos(\theta_3)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_3)$$

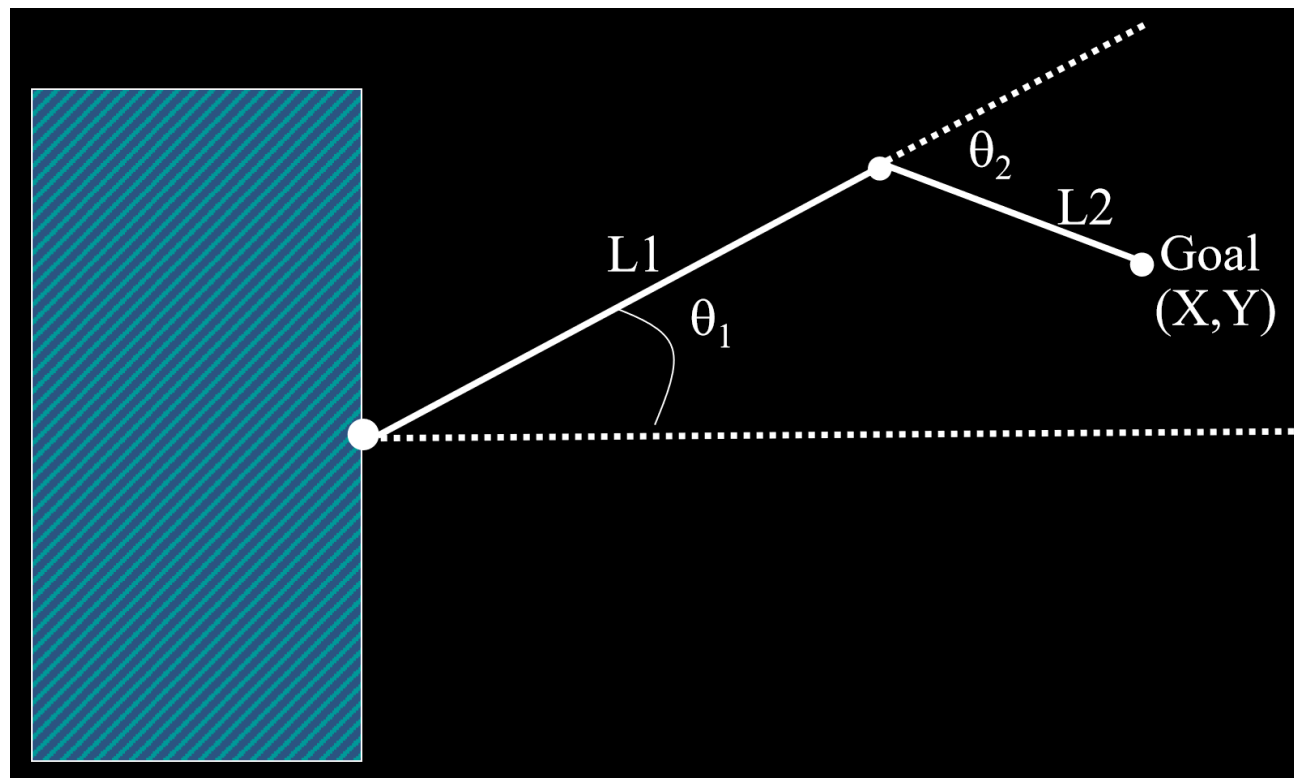


$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$$



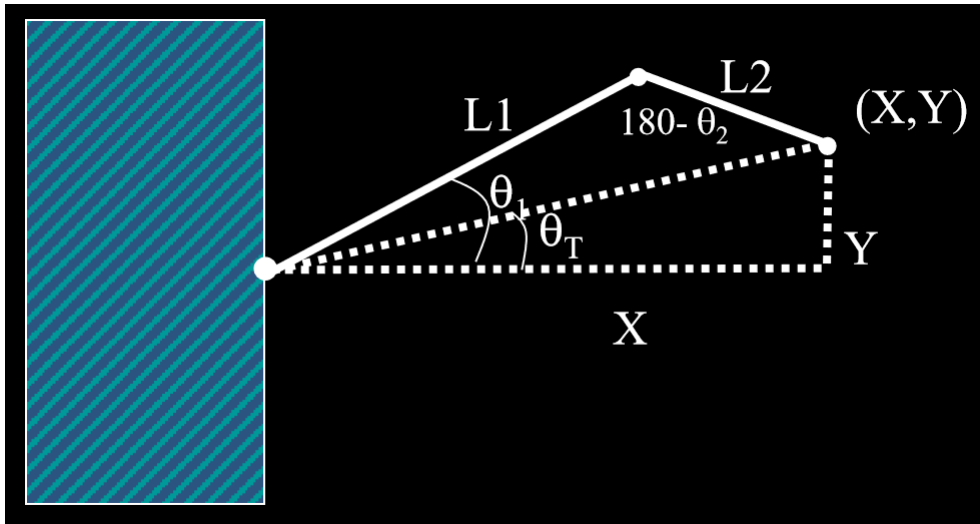
反向运动学解析求解法

- 已知 X 和 Y 、 $L1$ 和 $L2$ ，求解 θ_1 和 θ_2



反向运动学解析求解法

- 已知X和Y、L1和L2，求解 θ_1 和 θ_2



$$\theta_2 = 180 - \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - (X^2 + Y^2)}{2L_1L_2} \right)$$

$$\theta_T = \cos^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

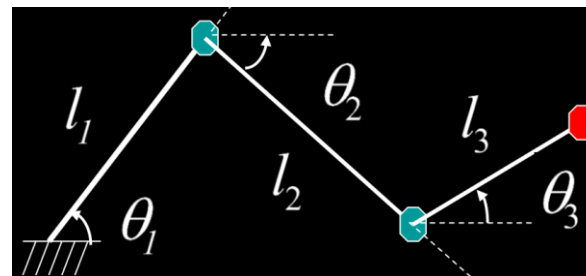
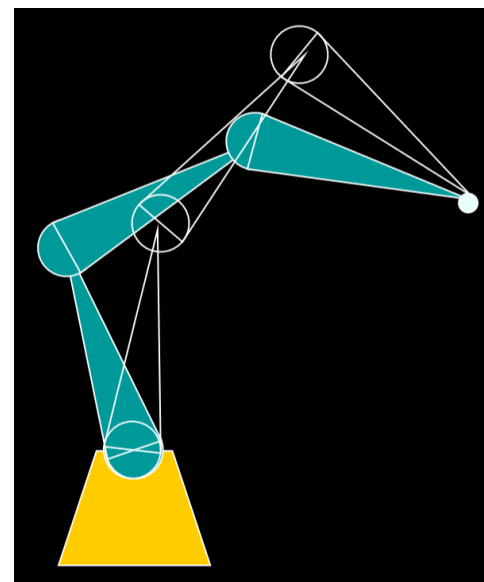
$$\cos(180 - \theta_2) = \frac{L_1^2 + L_2^2 - (X^2 + Y^2)}{2L_1L_2}$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_T) = \frac{L_1^2 + (X^2 + Y^2) - L_2^2}{2L_1\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + (X^2 + Y^2) - L_2^2}{2L_1\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) + \theta_T$$

反向运动学数值求解法

- 一般情况下复杂关节的IK是求解困难
 - 要求自然的运动控制
 - 关节限制
 - 最小的抖动(minimum jerk)
 - 运动方式
 - 奇异问题(Singularities)
 - 病态方程(ill-conditioned)
 - 奇异方程Singular

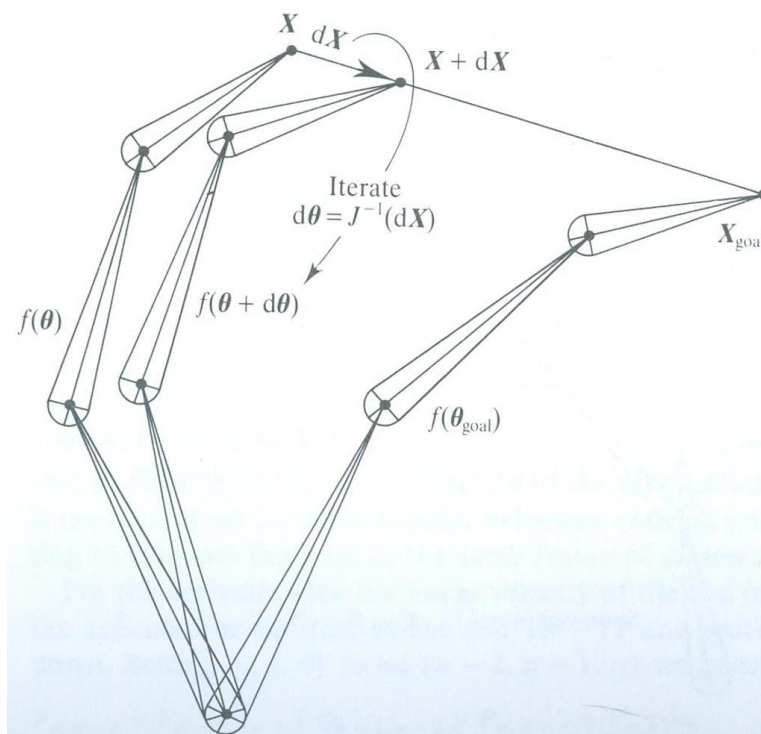


$$\theta_1, \theta_2, \theta_3 = f^{-1}(P)$$

反向运动学数值求解法

- 给定初始姿势和所需要的姿势，迭代变化关节角，使得末端影响器朝目标位置和方向前进

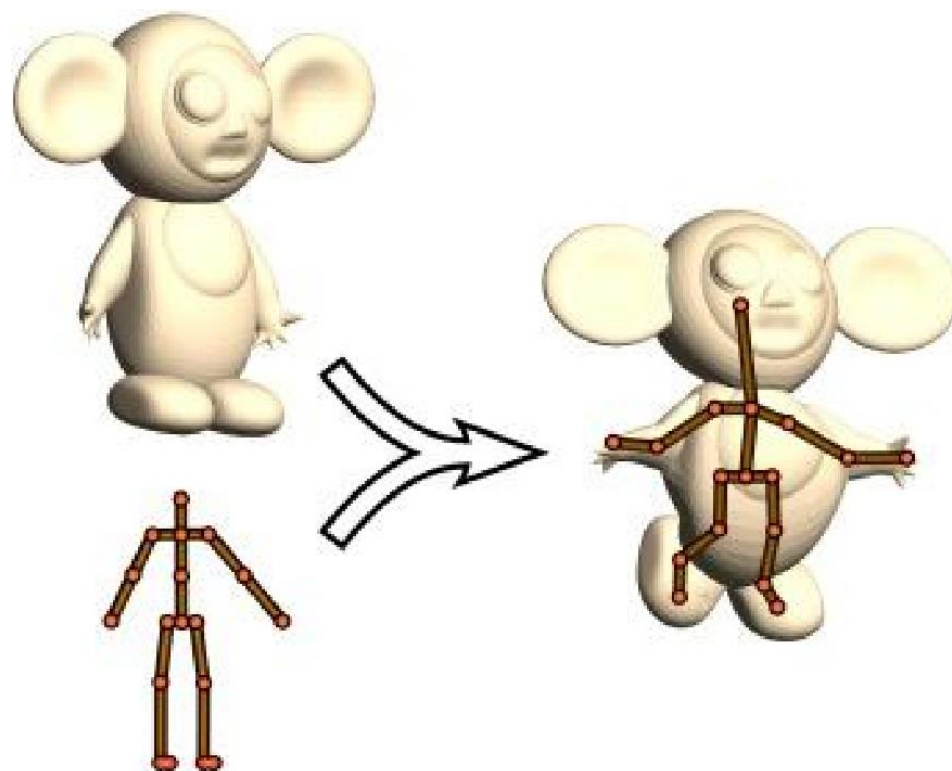
$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta t \dot{\theta}$$



骨架驱动皮肤动画

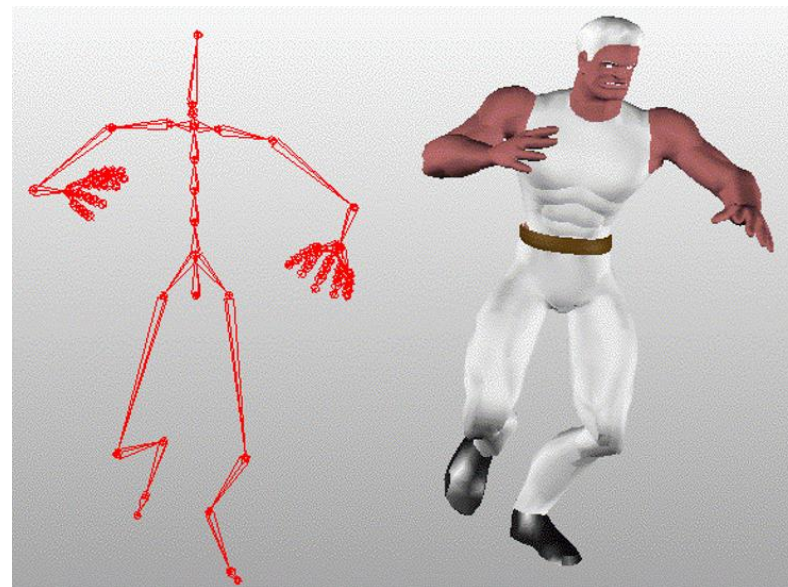
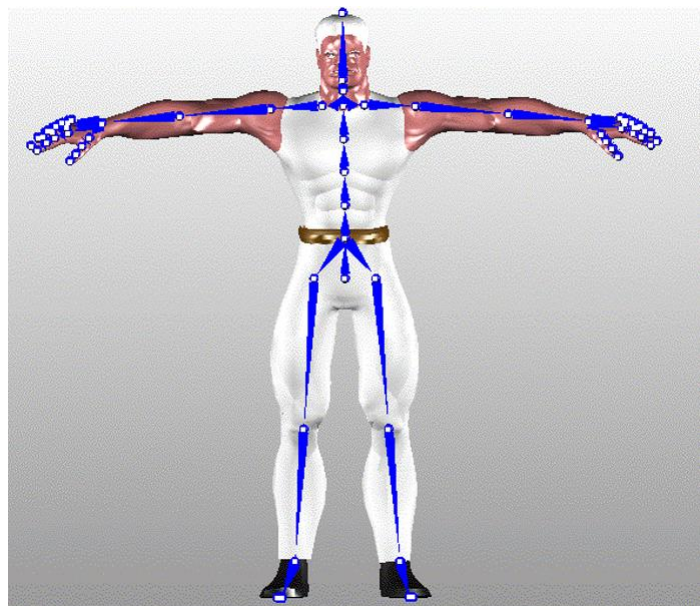
- 骨架绑定

- 角色的表面（外皮）必须随着骨架的运动而运动（变形），称为Rigging



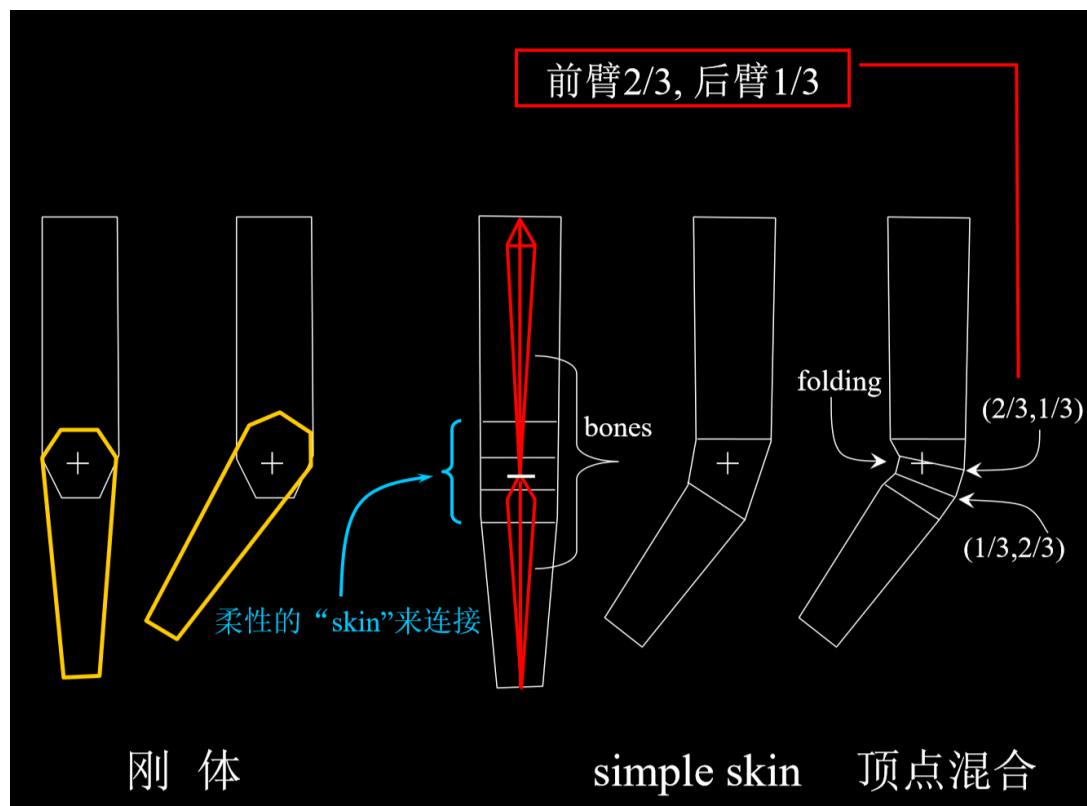
骨架驱动皮肤动画

- 骨架绑定
 - 皮肤的运动定义为对应控制骨架的函数
 - 采用一个称为中性姿势或静止姿势（Rest pose）的几何信息



骨架驱动皮肤动画

- 顶点混合 (Vertex blending)
 - 重叠部分采用加权变换，按给定权重影响变形

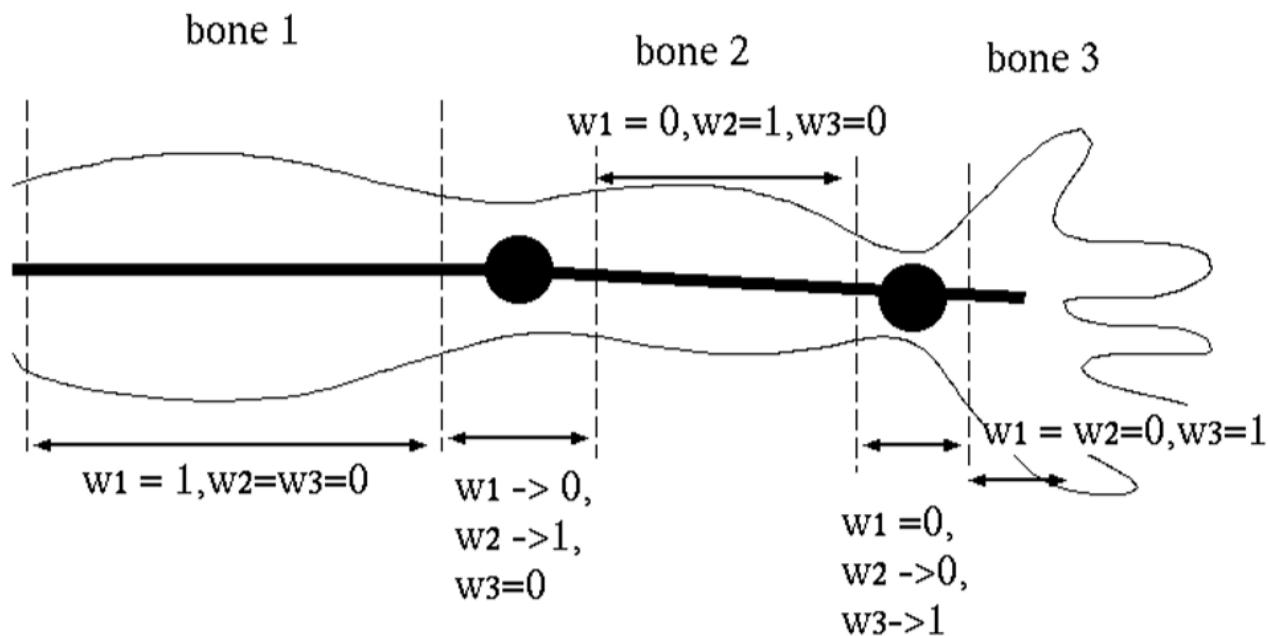


骨架驱动皮肤动画

- 顶点混合 (Vertex blending)

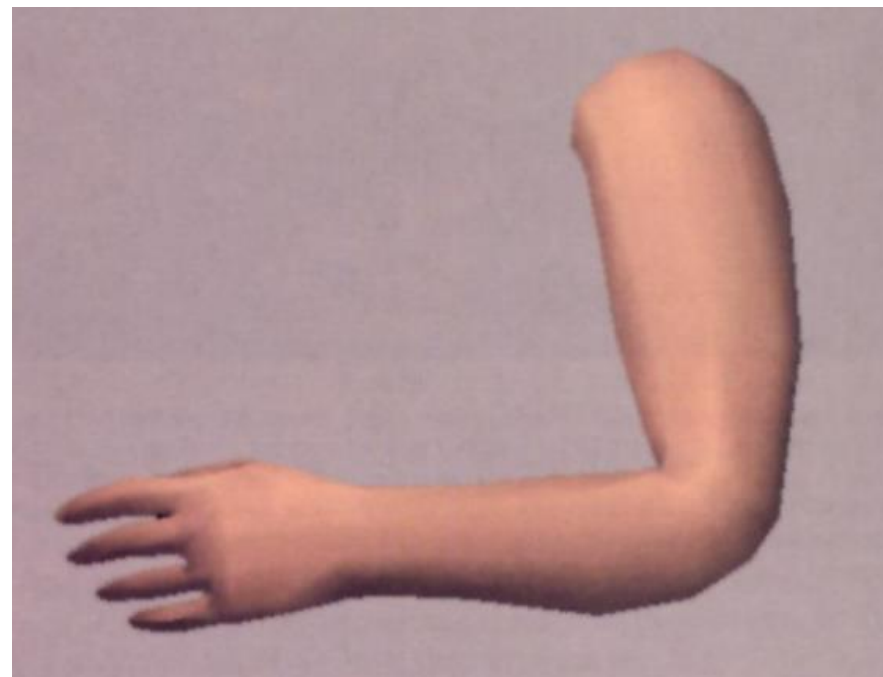
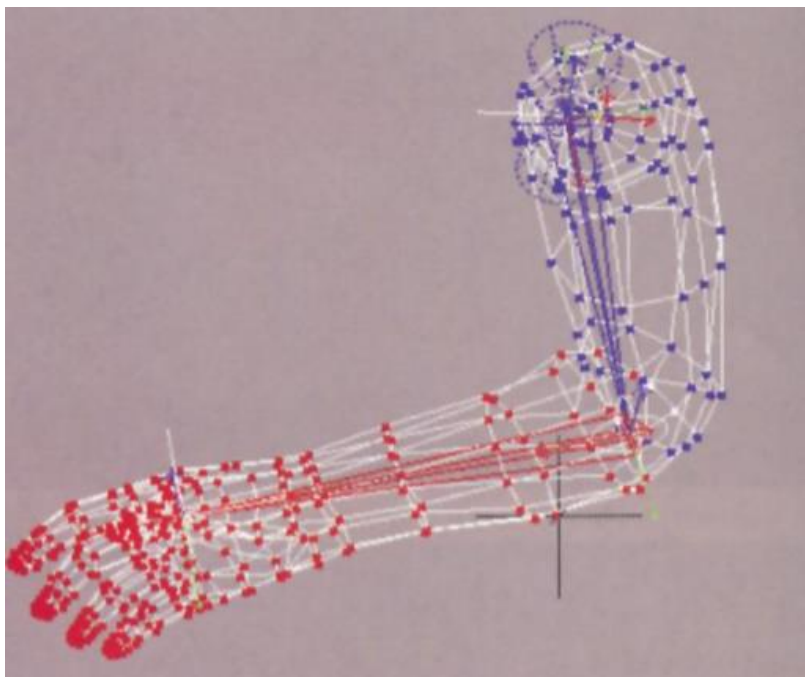
- 重叠部分采用加权变换，按给定权重影响变形

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i \mathbf{B}_i(t) \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{P}, \quad \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i = 1$$



骨架驱动皮肤动画

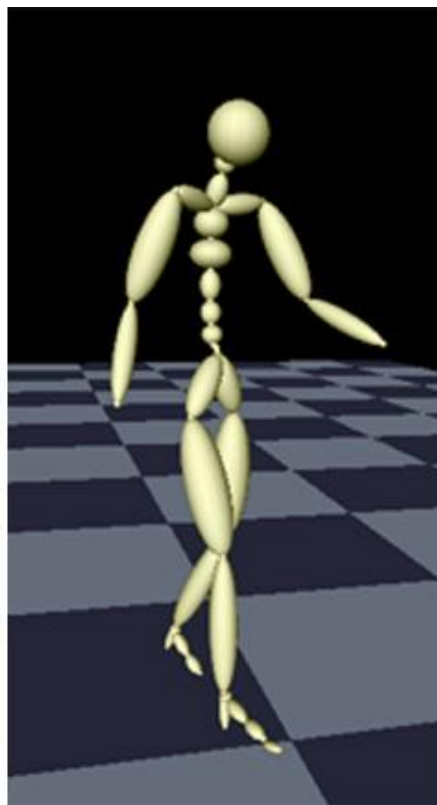
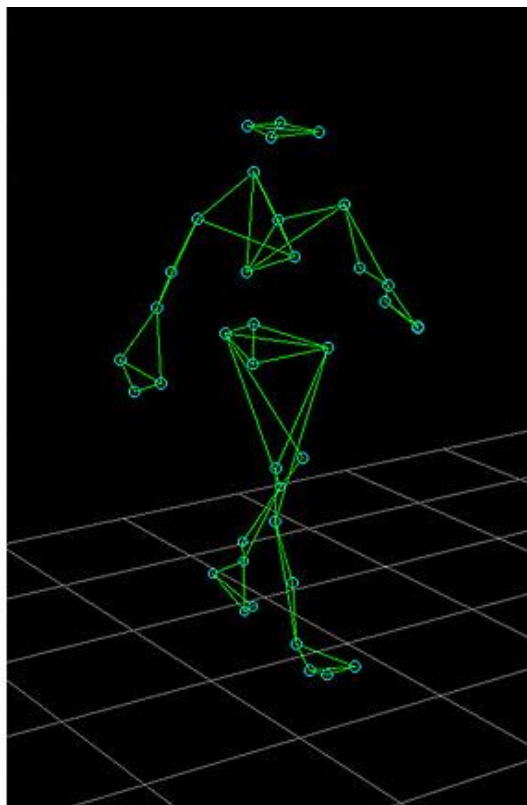
- 顶点混合 (Vertex blending)
 - 结果



运动捕捉

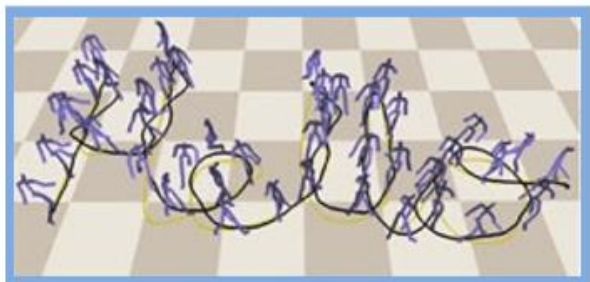
运动捕捉 (motion capture)

- 通过软/硬件方式记录、分析并处理人或其他物体动作的技术
- 也称动态捕捉、运动跟踪等



运动捕捉 (motion capture)

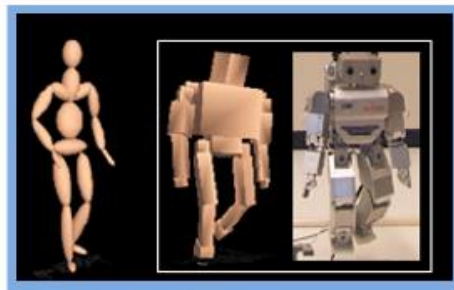
- 广泛应用于军事、娱乐、体育、医疗、视觉等



Computer animation



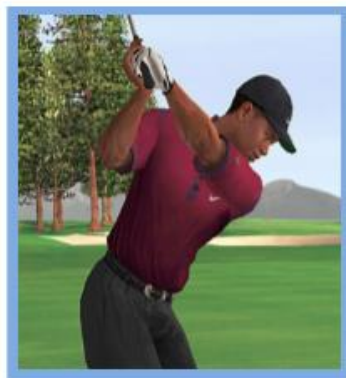
Biomechanics



Robotics



Cinema



Video games



Anthropology

运动捕捉方法

- **主动式**：系统本身发射信号用于探测动作，需要依附在肢体上的标记进行记录
 - 电子机械式 (Electromechanical)
 - 光纤 (Optical fiber)
 - 闪光标记 (Strobing LED)
- **被动式**：系统本身不发射信号，无需标记
 - 光学式 (Optical)

主动式运动捕捉

• 电子机械式

- 通过机械装置将传感器附着在肢体上主要关节点处，形成连接在一起的测量结构
- 优点
 - 实时捕捉
 - 没有遮挡
 - 可捕捉的动作范围大
- 缺点
 - 可支持的动作类型有限
 - 采样率相对较低



主动式运动捕捉

- 电子机械式

- 案例：侏罗纪公园

- 恐龙行走、奔跑等动作通过捕捉人的运动获取
 - 计算机建模的恐龙模型按照捕捉的动作产生动画序列画面



主动式运动捕捉

- 光纤式

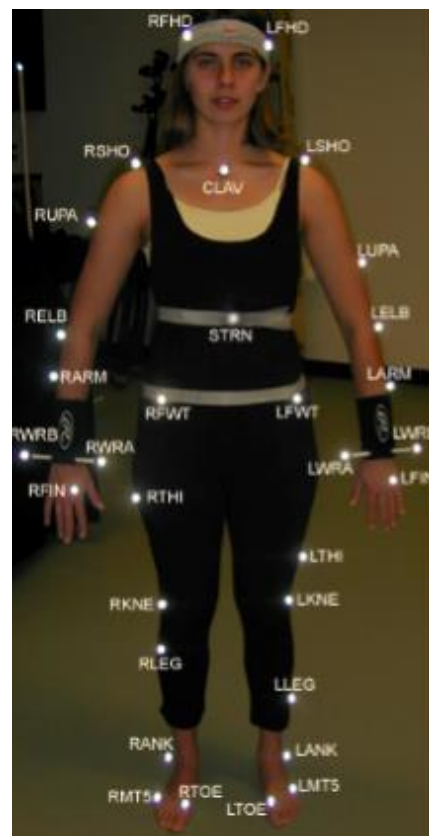
- 在数据手套中沿手指等布置光纤传感器
- 优点
 - 没有遮挡
 - 实时捕捉
 - 可捕捉小范围的弯曲等运动
- 缺点
 - 根据个体进行调整
 - 捕捉精度较低
 - 只适用于手的动作



主动式运动捕捉

• 闪光标记

- 通过在较暗光照下拍摄附着在肢体上的闪光点跟踪运动状态
- 优点
 - 捕捉速度快
 - 捕捉精度高
- 缺点
 - 只能在室内有限光亮环境使用
 - 存在肢体遮挡
 - 捕捉动作的精度受相机位置影响



被动式运动捕捉

- 光学图像式

- 通过拍摄视频重建三维动作序列

- 优点

- 捕捉速度快
 - 设备简单

- 缺点

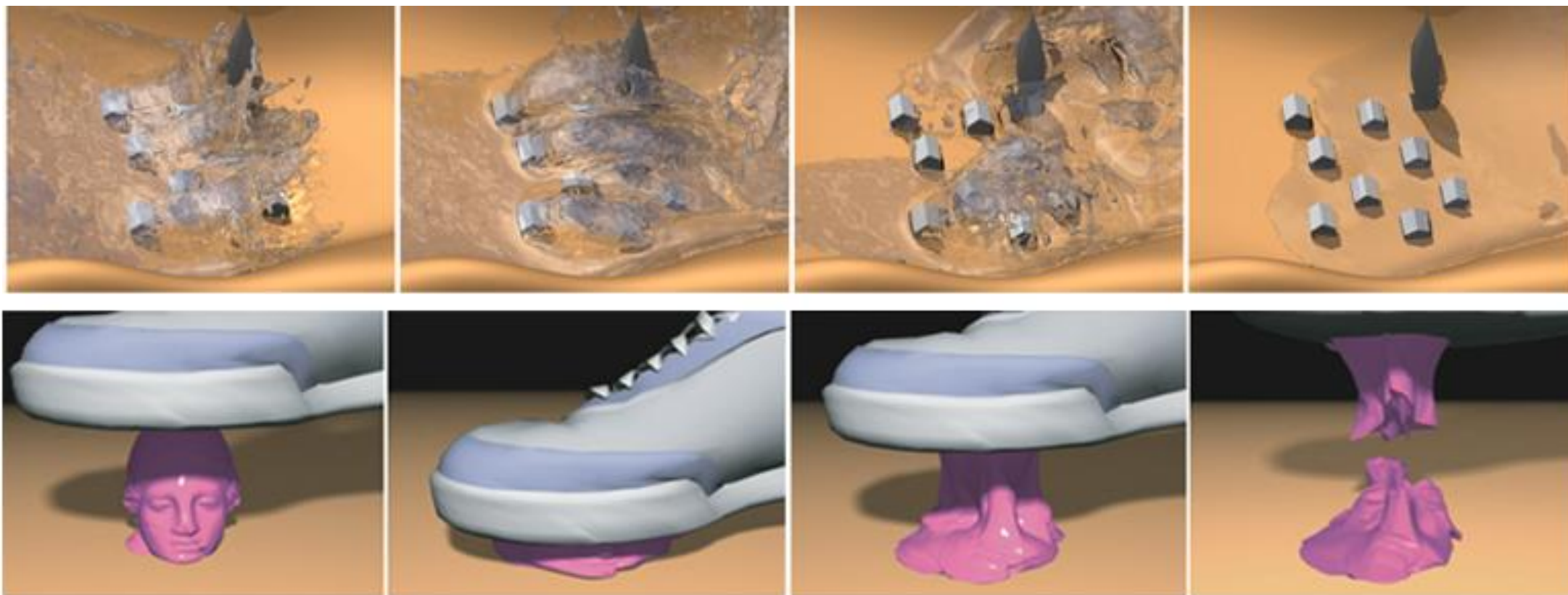
- 受光照等影响
 - 存在肢体遮挡
 - 捕捉动作的精度



物理模拟

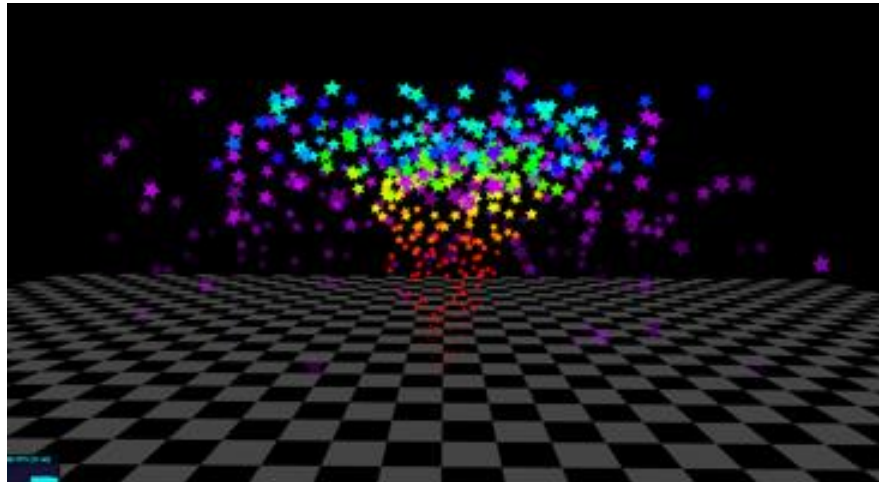
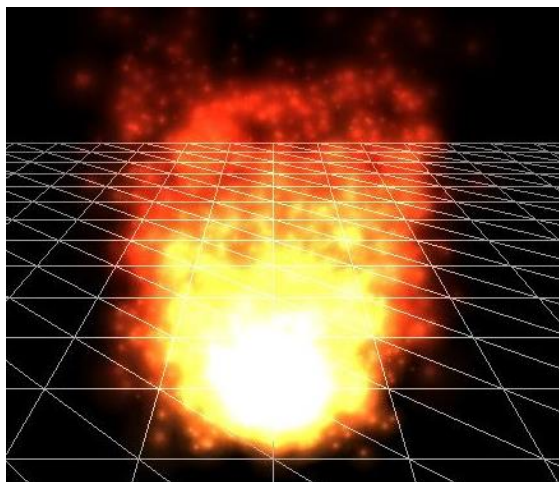
定义

- 通过对物理过程的模拟产生动画，生成连续变化的动画序列，使其满足物理规律
- 从物理学角度研究计算机动画中的运动规律



粒子系统

- 曲面或网格无法有效表示不规则或随机变化形体（云、雾、流体等）
- **粒子系统**
 - 1983年，卢卡斯电影公司Reeves提出
 - 采用粒子作为基本单位，通过其集合体表达一定形状的形体
 - 粒子：点、球、椭球、立方体、圆等形状



粒子系统基本原理

- 假设

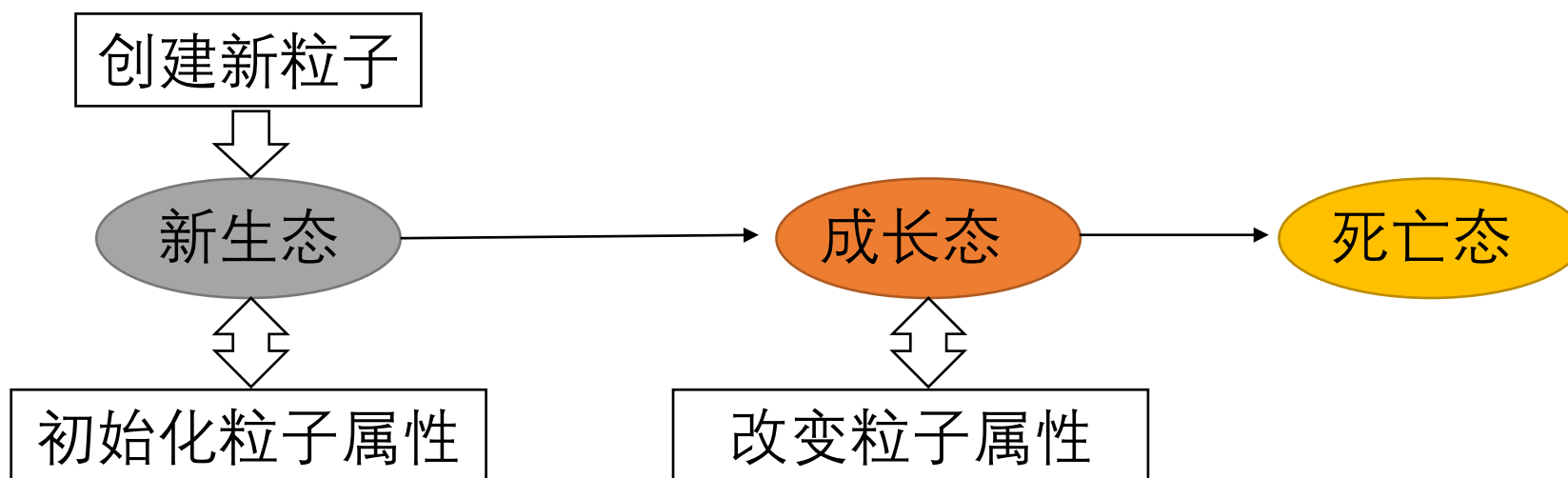
- 粒子一般与其它粒子不碰撞
- 除非处于聚集状态，粒子不向其它粒子 投射阴影
- 粒子只向其它环境投射阴影
- 粒子不反射光
- 粒子通常有有限的生命周期



粒子系统基本原理

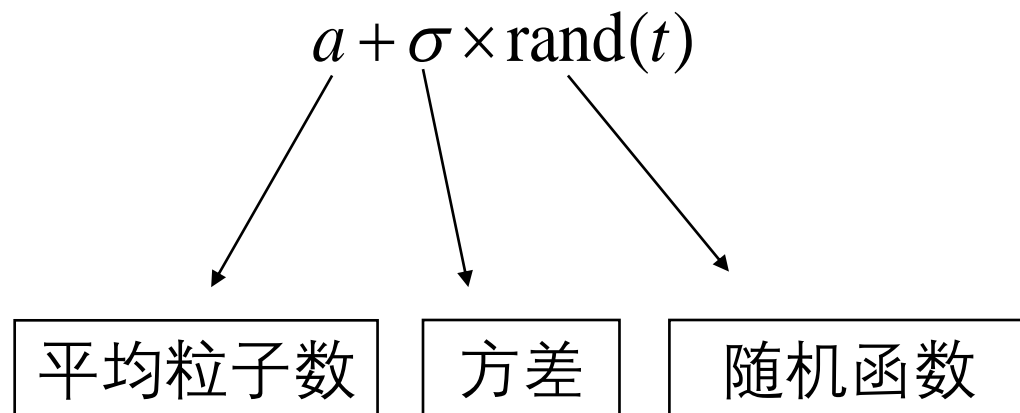
- 粒子生命周期

- 新生态：刚创建的粒子所处的状态（初始化）
- 成长态：在生命值内的粒子属性的变化状态
- 死亡态：存在时间超过生命值后的状态



粒子新生态

- 对于某一瞬间的画面，新的粒子会根据一个控制的随机过程加入系统

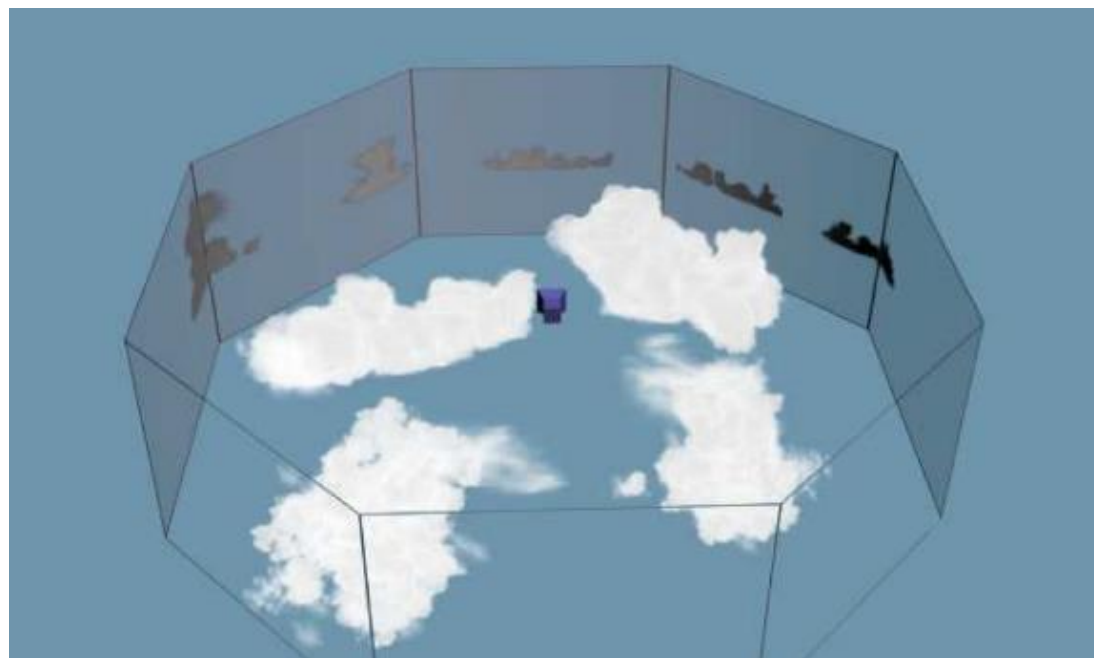


粒子成长态

- 每个粒子根据其初始状态和随机过程，通过属性的变化产生新的状态，以此得到一帧新的画面



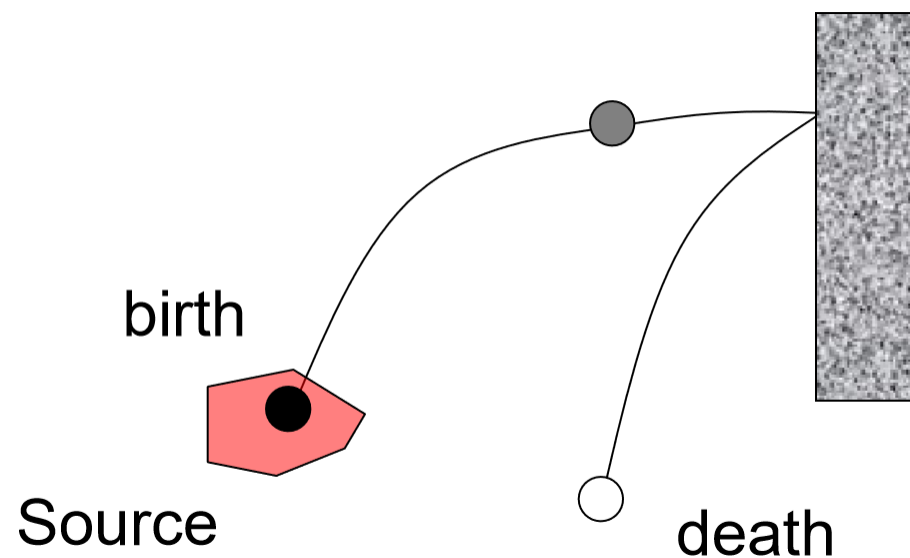
(a) 粒子光源



(b) 纹理广告牌

粒子死亡态

- 系统删除那些已经超出其生命周期的粒子
 - 生命周期结束
 - 淡出
 - 移走



粒子系统结果



Thank you!

Questions?