



# Lecture 21: 计算机动画介绍

SSE315: 计算机图形学  
Computer Graphics

---

陈壮彬

软件工程学院

chenzhb36@mail.sysu.edu.cn

# Course roadmap

## 光栅化 Rasterization

计算机图形学介绍  
基于采样的光栅化  
空间变换  
纹理映射、深度和透明度

## 几何 Geometry

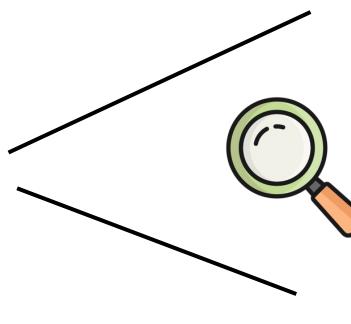
几何介绍  
曲线与曲面  
几何处理

## 材质与光线 Materials and Lighting

光线几何  
光线追踪  
辐射度量学  
材料与高级渲染  
相机与颜色

## 动画 Animation

计算机动画介绍



计算机动画介绍

# Today's topics

- 动画的发展历史 (History)
- 关键帧动画 (Keyframe animation)
- 物理模拟 (Physical simulation)
- 运动学 (Kinematics)
- 动画中涉及的技术 (Techniques in animation)

# 计算机动画

## □ 让事物活起来

- 作为一种交流工具
- 关注审美 (aesthetic issues) 大于技术 (technical issues)

## □ 建模/几何的扩展

- 将场景模型 (scene models) 表示为时间的函数

## □ 按顺序观看时具有“运动感”的图像序列

- 电影：24 帧/秒 (frames per second, fps)
- 视频 (一般)：30 帧/秒
- 虚拟现实：90 帧/秒 (才让人不会觉得眩晕)

# 动画的发展历史

# The History of Animation

# 来自远古的第一个动画



(Shahr-e Sukhteh, Iran 3200 BCE)

# 动画的历史



(Phenakistoscope, 1831)

# 第一个电影

- 电影技术最初用作科学工具 (如研究动物形态) 而非娱乐
- 加速动画发展的关键技术



Edward Muybridge, "Sallie Gardner" (1878)

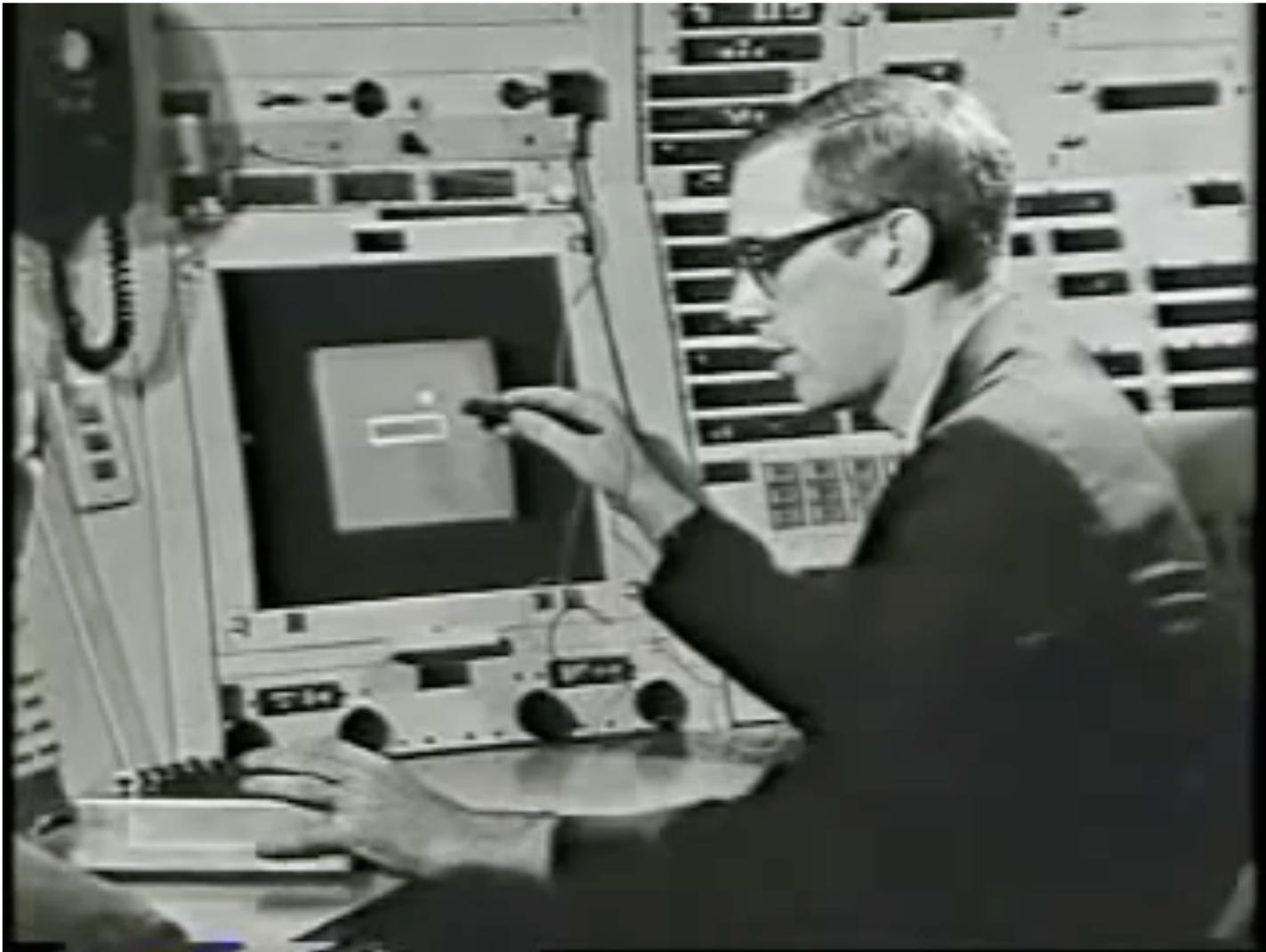
# 第一个手绘动画 (>40分钟)



Disney's Snow White and the Seven Dwarfs Available on Blu-ray™ and Digital HD

Disney, "Snow White and the Seven Dwarfs" (1937)

# 第一个数字计算机生成的动画



Ivan Sutherland, "Sketchpad" (1963) – Light pen, vector display

# 早期计算机动画



Ed Catmull & Frederick Parke, "Computer Animated Faces" (1972) 10

# 恐龙



Jurassic Park (1993)

# 第一部 CG (computer-generated) 长片



Pixar, "Toy Story" (1995)

# 计算机动画 – 2009



Sony Pictures Animation, "Cloudy With a Chance of Meatballs" (2009)

# 计算机动画 – 2019



Walt Disney Animation Studios, "Frozen 2" (2019)

# 关键帧动画

# Keyframe Animation

# 关键帧动画

Keyframes



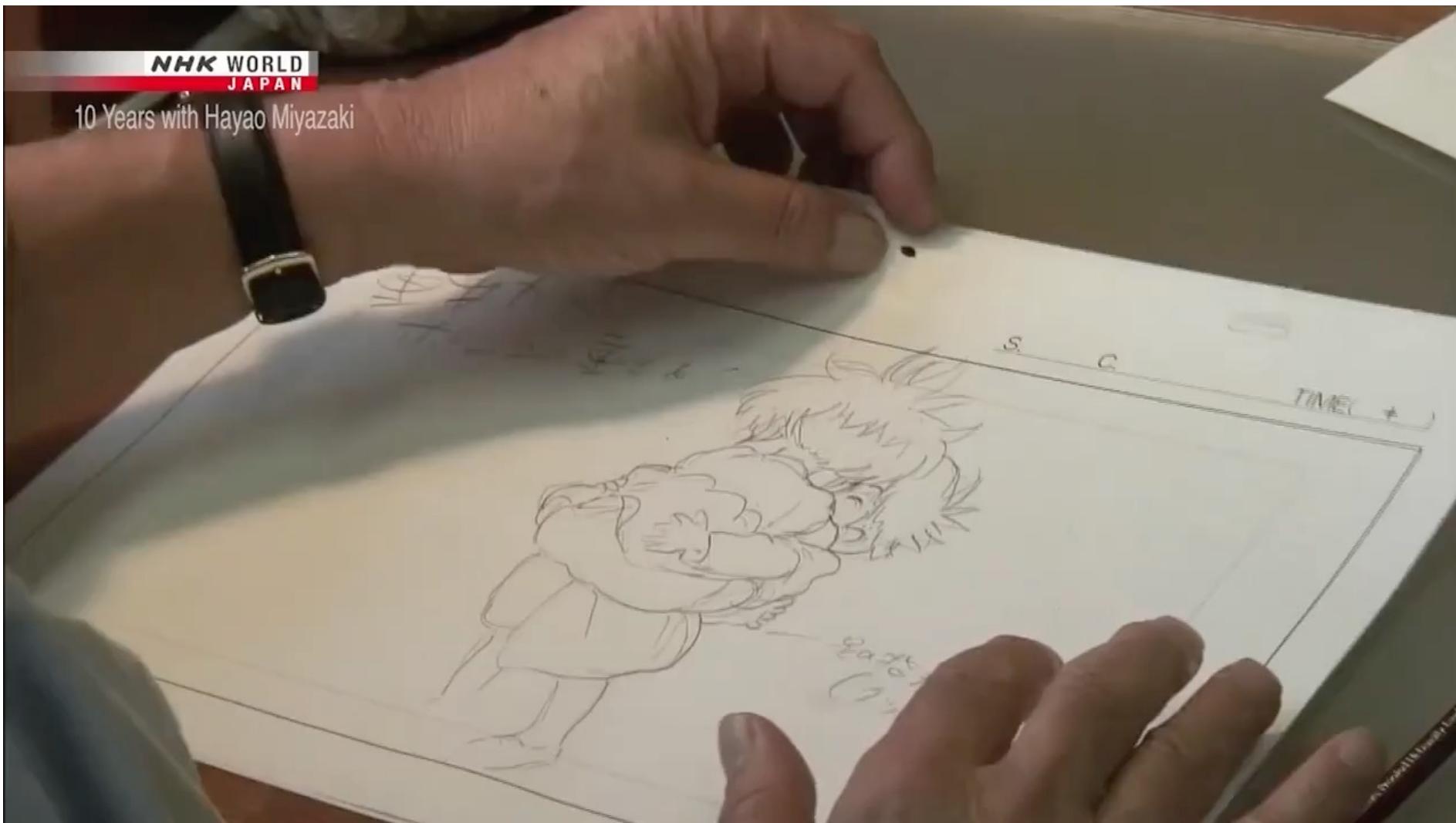
"Tweens"



□ 动画师 (如首席画师) 绘制关键帧

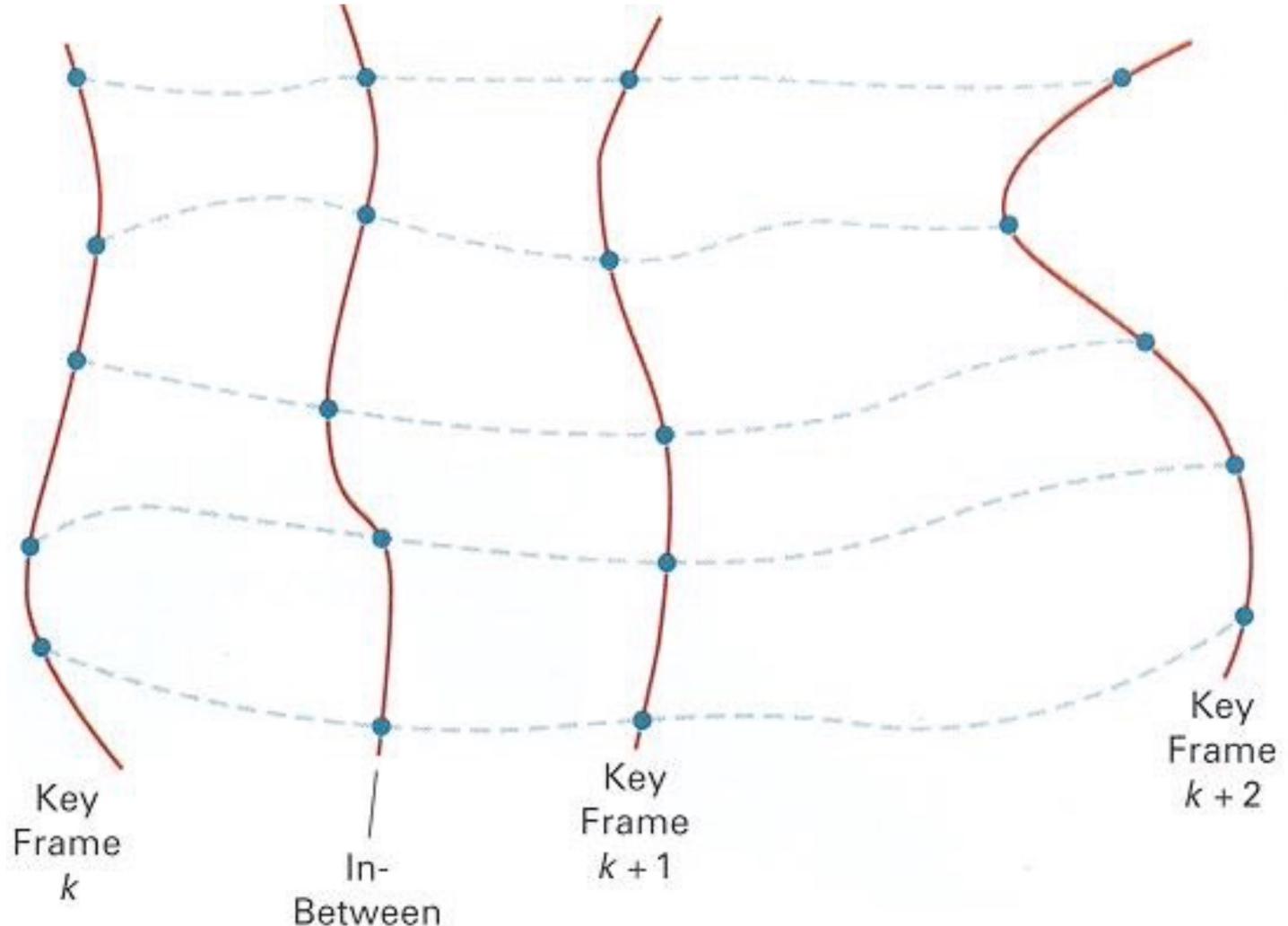
□ 助理 (人或计算机) 绘制中间帧 (tweening)

# 悬崖上的金鱼公主



# 关键帧插值

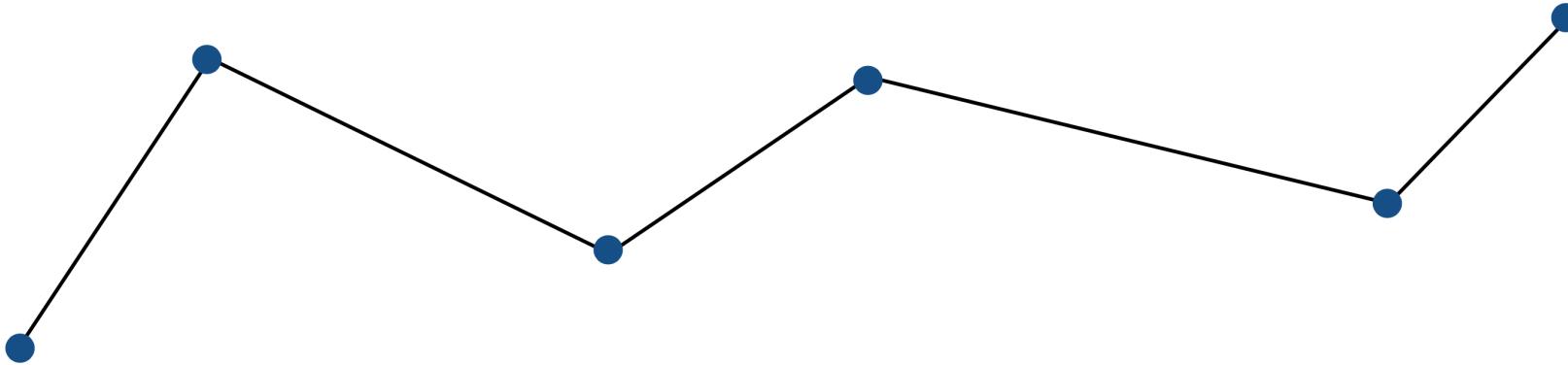
将每一帧视为关键点的向量



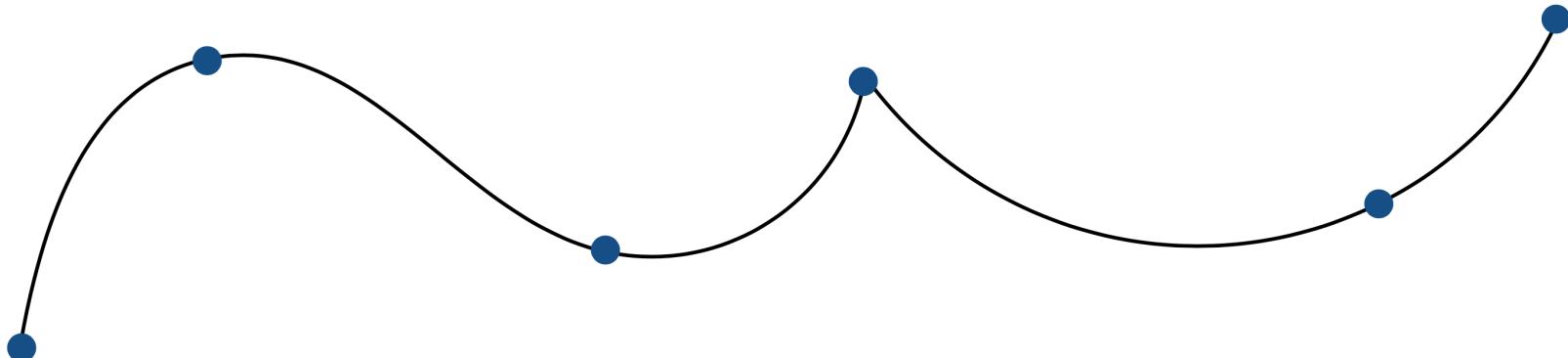
Hearn, Baker and Carithers, Figure 16.11

# 每个参数的关键帧插值

□ 线性插值 (通常不够好)



□ 使用样条曲线 (splines) 进行平滑/可控的插值



# 物理模拟 Physical Simulation

# 牛顿定律

口在动画中加入符合现实的物理规律

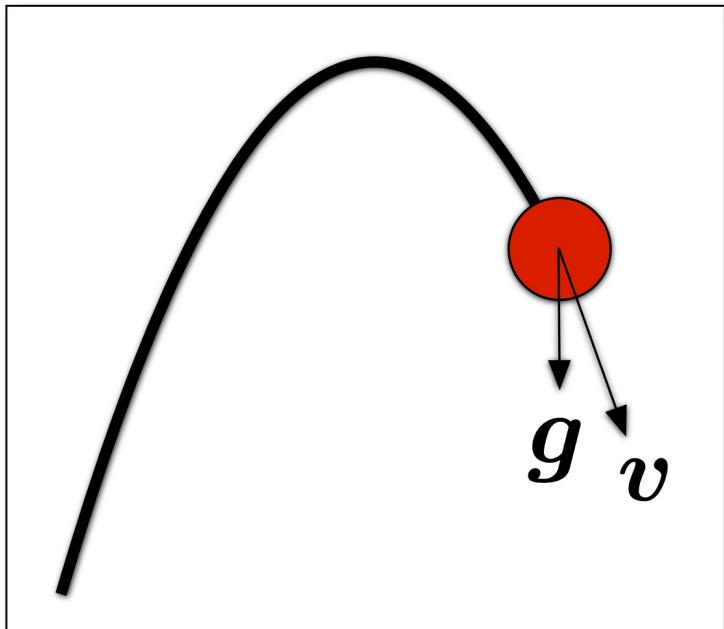
$$F = ma$$

↑  
Force  
力

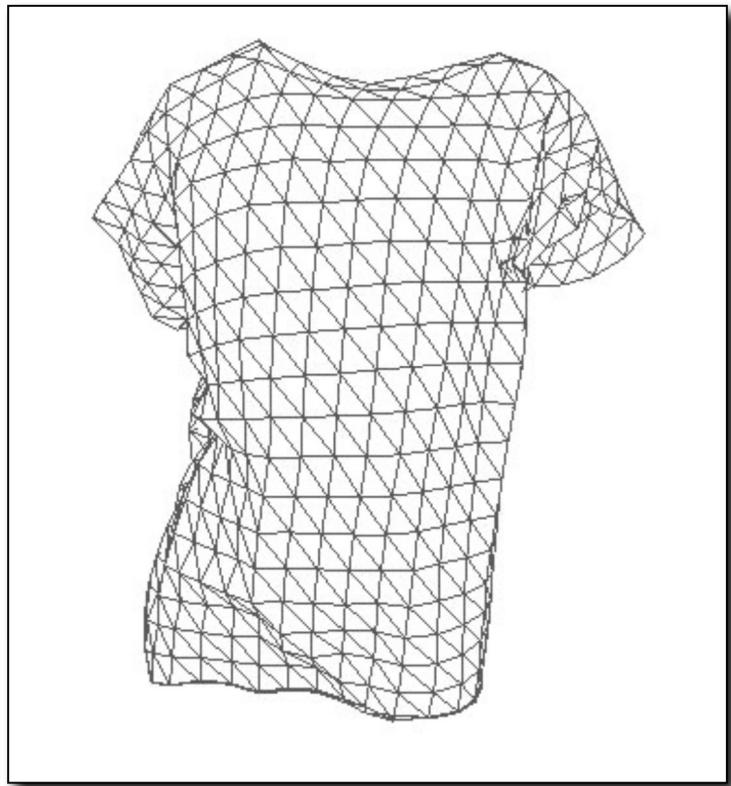
↑      ↑  
Mass    Acceleration  
质量    加速度

# 基于物理的动画

- 使用数值方法模拟物体的运动过程
- 正确建模各个点的受力



$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \Delta t \mathbf{v}^t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 \mathbf{a}^t$$

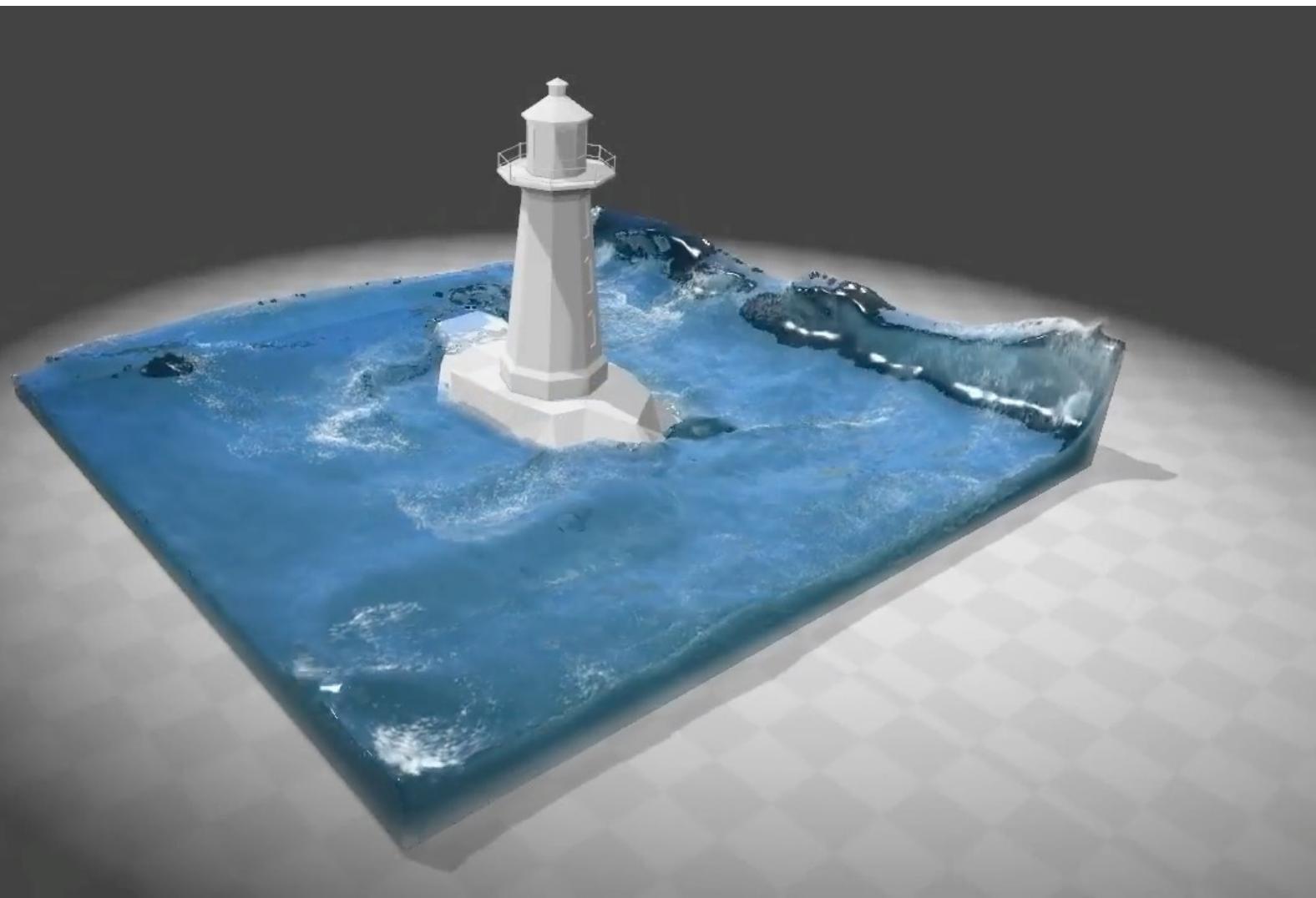


# 例子：衣服模拟

口力的相互作用、碰撞检测



# 例子：液体 (分建模和渲染两部分)



Macklin and Müller, Position Based Fluids

# 质点弹簧系统 动力学系统建模示例

# 示例：质点弹簧绳索



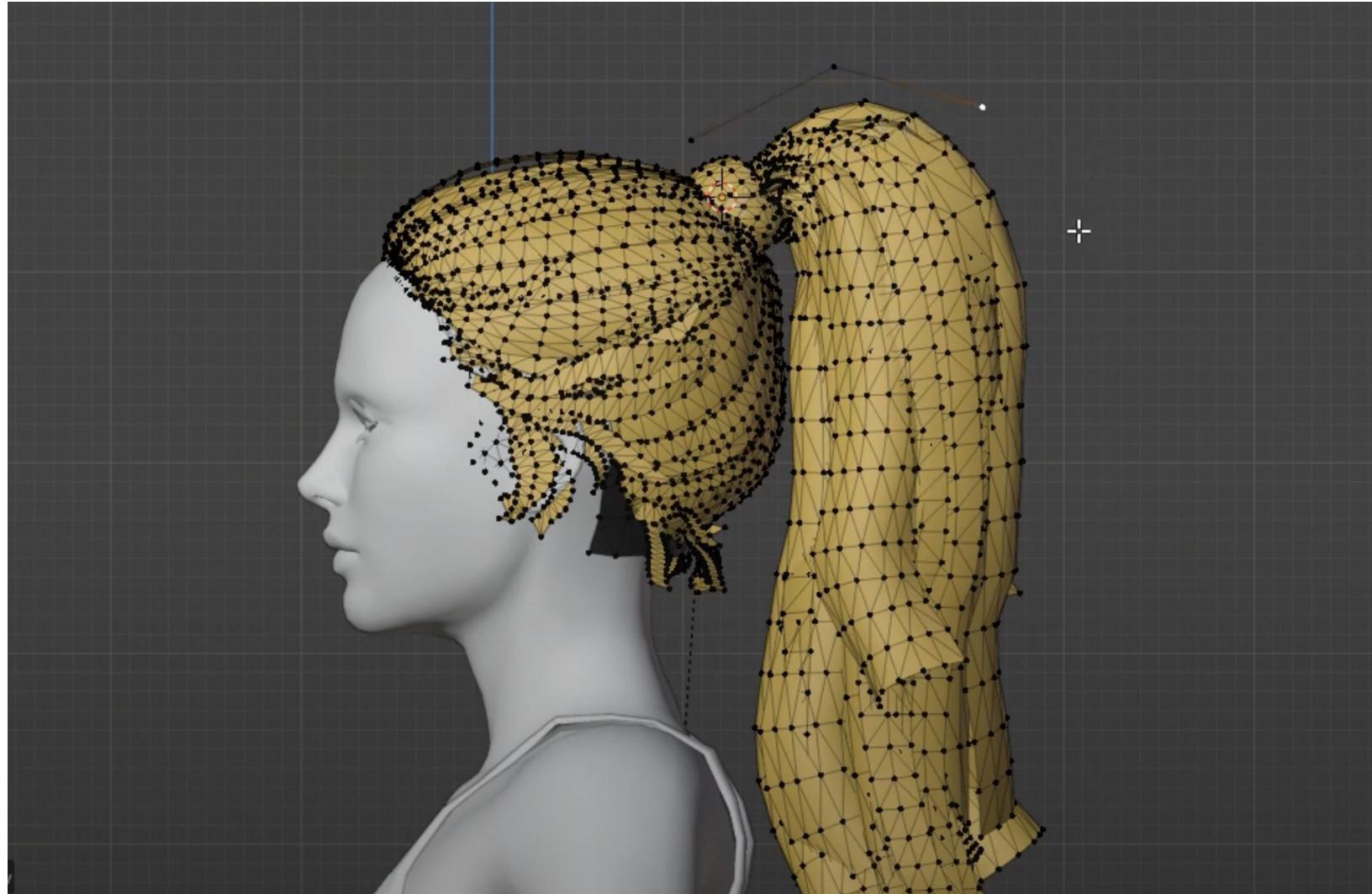
# 示例：头发

口头发受重力、摩擦力影响

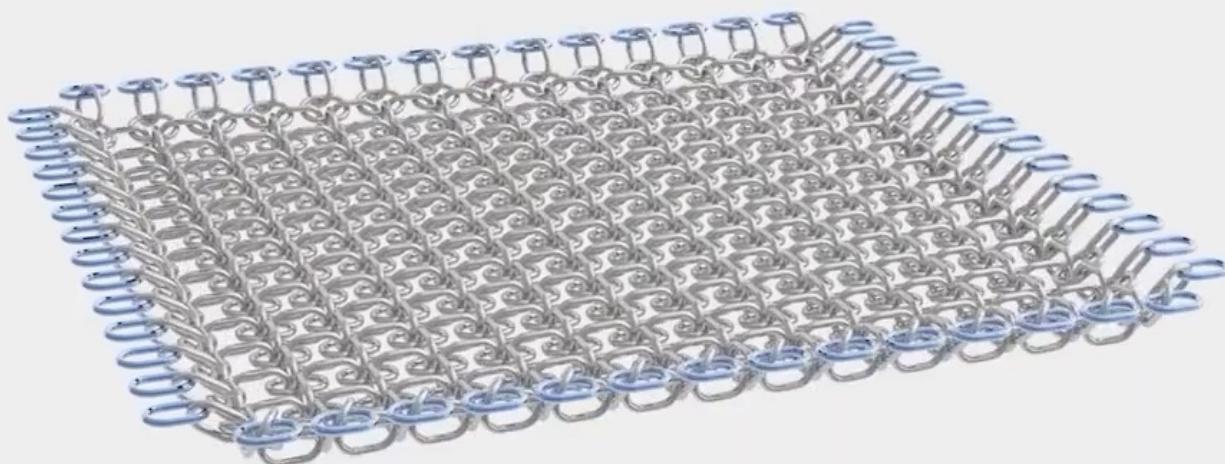


# 示例：头发

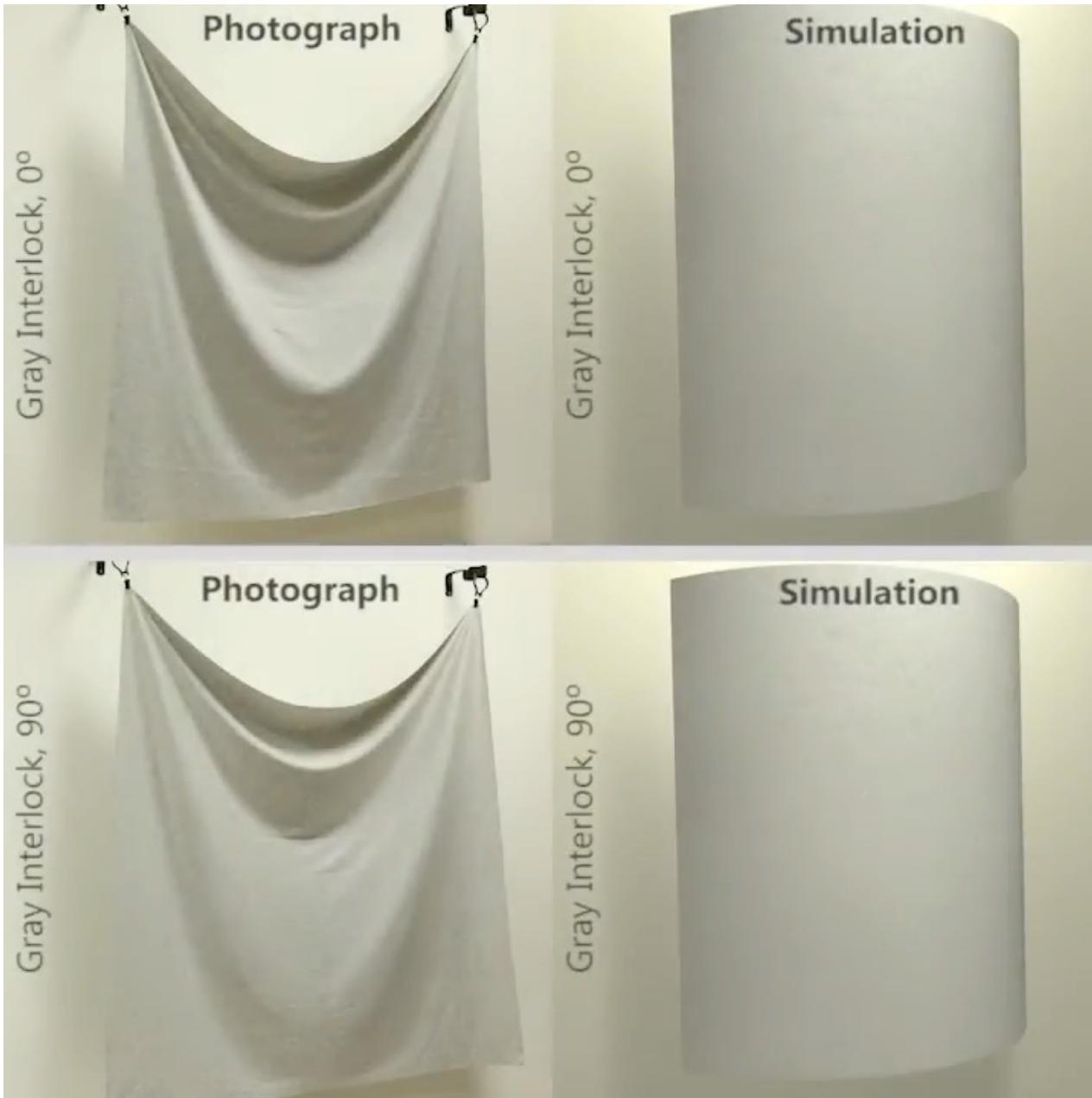
口头发受重力、摩擦力影响



# 示例：质点弹簧网格



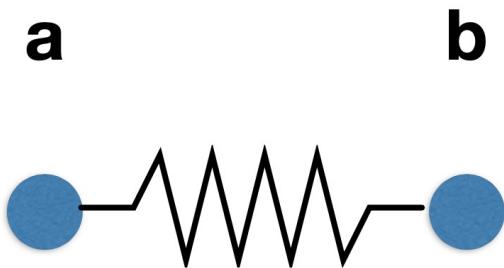
例如，将直升机放在网袋中，  
For instance, keep your helicopters in a mesh bag



Huamin Wang, Ravi Ramamoorthi, and James F. O'Brien. "Data-Driven Elastic Models for Cloth: Modeling and Measurement". *ACM Transactions on Graphics*, 30(4):71:1–11, July 2011. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011, Vancouver, BC Canada.

# 一个简单的弹簧

□基础模型：理想化的弹簧 (质点+弹簧)



$$f_{a \rightarrow b} = k_s(b - a)$$

$$f_{b \rightarrow a} = -f_{a \rightarrow b}$$

□弹簧的力将点拉到一起

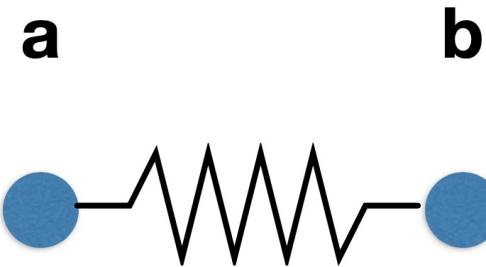
□强度与位移成比例 (胡克定律 Hooke's Law)

□ $k_s$  是弹簧系数 (spring coefficient)：刚度 (stiffness)

□问题：此处假定弹簧的静止长度为零，而实际并非如此

# 非零长度的弹簧

□ 静止长度 (rest length) 非零的弹簧



$$f_{a \rightarrow b} = k_s \frac{b - a}{\|b - a\|} (\|b - a\| - l)$$

归一化的受力方向      静止长度

□ 问题：永远振荡下去      增加摩擦力！

# 导数的点表示法 (Dot notation for Derivatives)

如果  $x$  是感兴趣点位置的矢量，我们使用点符号表示该点的速度 (velocity) 和加速度 (acceleration):

$$\begin{aligned}x \\ \dot{x} = v \\ \ddot{x} = a\end{aligned}$$

# 能量损失

## 口简单运动阻尼 (motion damping)



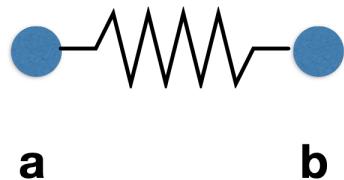
- 表现为运动的粘性阻力 (viscous drag)
- 减缓速度方向上的运动
- $k_d$  是阻尼系数 (damping coefficient)

## 口问题：会减慢系统整体的运动

- 只能描述外部的力，无法描述内部的损耗
- 想象一个生锈的弹簧的振荡减慢，它落地是否也更慢？

# 弹簧的内部阻尼

仅阻尼内部、弹簧驱动的运动



a

b

Damping force  
applied on b

b 受到的阻尼力

$$f_b = -k_d \frac{b - a}{\|b - a\|} (\dot{b} - \dot{a}) \cdot \frac{b - a}{\|b - a\|}$$

Relative velocity projected to  
the direction from a to b (scalar)  
投影到 ab 方向的  
相对速度 (标量)

a 和 b 的相对速度

Relative velocity of b,  
assuming a is static (vector)

Direction from  
a to b

从 a 到 b 的  
方向 (归一化)

粘性阻力仅在弹簧长度变化时产生

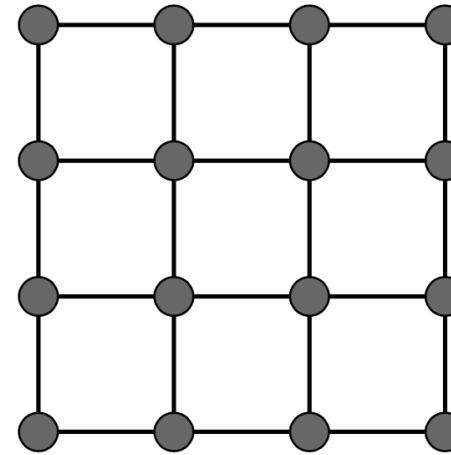
- 不会减缓弹簧系统的整体运动 (例如全局平移或旋转)

注：这只是一个特定类型的阻尼

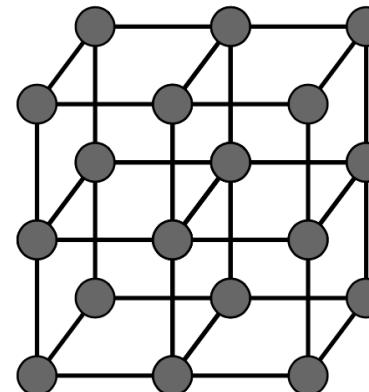
# 弹簧结构

更复杂的弹簧结构

Sheets



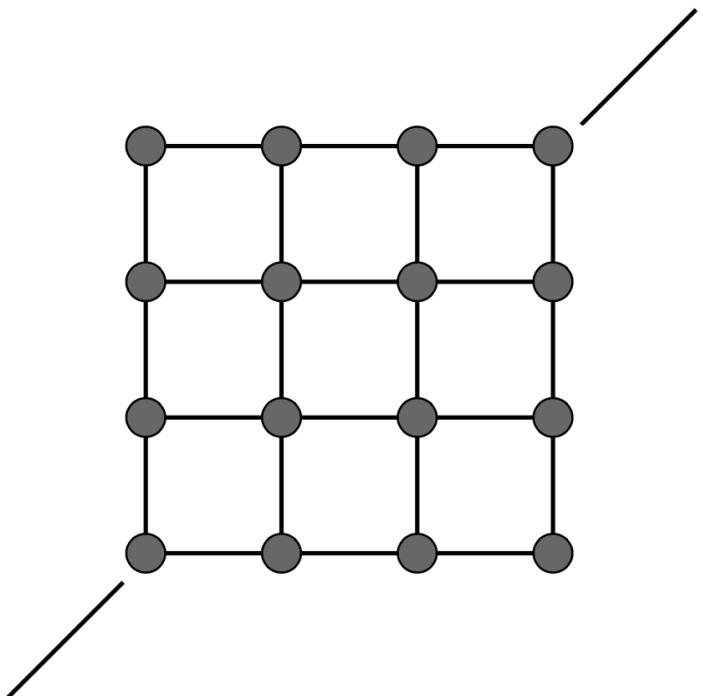
Blocks



Others

# 弹簧结构

口系统的行为由其连接结构决定

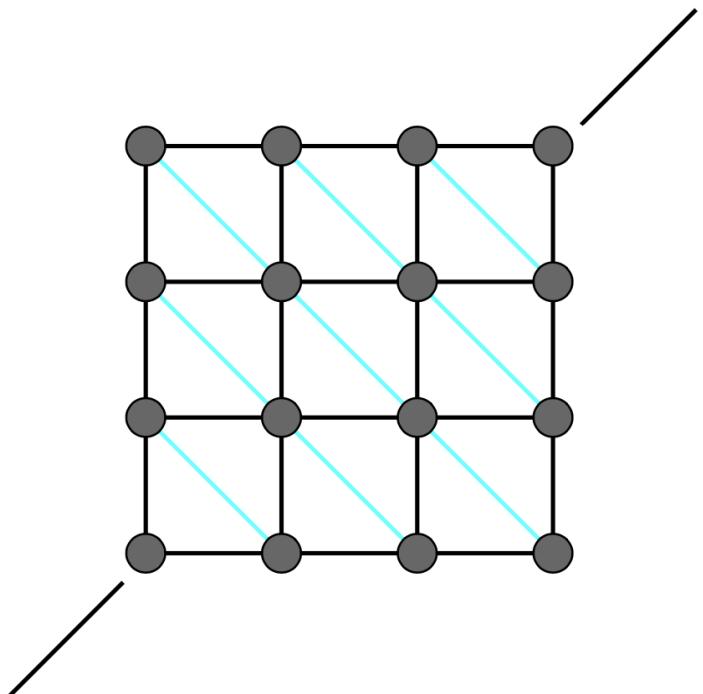


这种结构不能抵抗切变 (shearing)

这种结构不能抵抗平面外弯曲 (out-of-plane bending), 比如对折

# 弹簧结构

系统的 behavior 由其连接结构决定

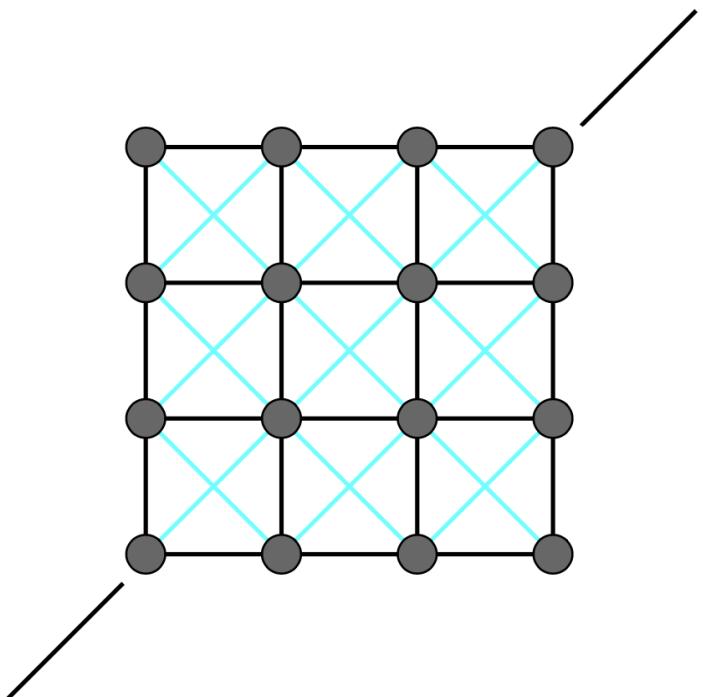


这种结构可以抵抗切变 (shearing) ,  
但具有各向异性偏差 (anisotropic bias)

这种结构也不能抵抗平面外弯曲

# 弹簧结构

系统的 behavior 由其连接结构决定

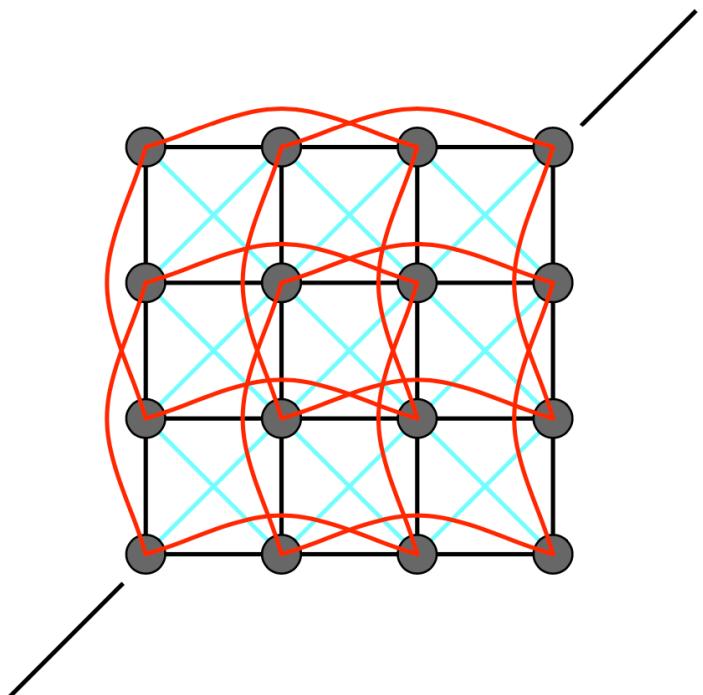


这种结构可以抵抗切变，且各向异性偏差较小

这种结构还是不能抵抗平面外弯曲

# 弹簧结构

系统的 behavior 由其连接结构决定



这种结构可以抵抗切变，且各向异性偏差较小

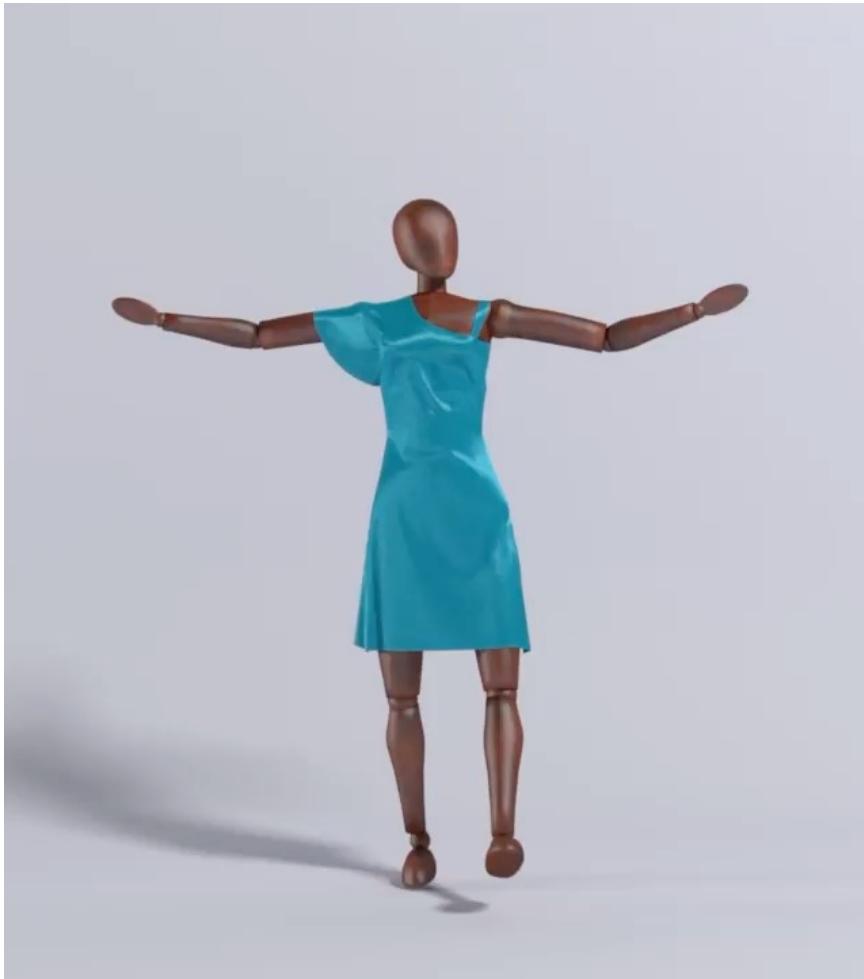
这种结构可以抵抗平面外弯曲；  
红色弹簧弹性应该很弱

# 例子：质点弹性衣服+角色



# FEM (有限元法) 代替质点弹簧

□ Finite Element Method, FEM, 建模力的传导



# 粒子系统

# Particle System

# 粒子系统

□ 将动力学系统建模为大量粒子的集合  
(灰尘、雾)

□ 每个粒子的运动由一组力定义

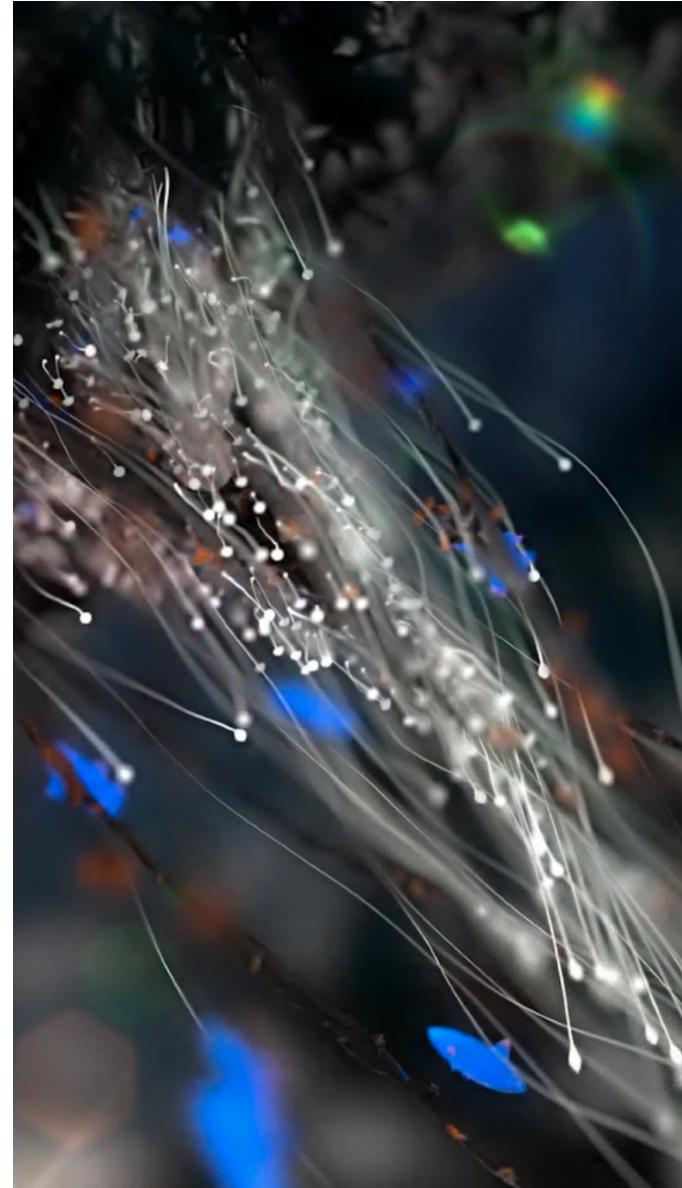
- 内部粒子之间的力
- 外部重力、风吹的力等

□ 图形和游戏中的常用技术

- 易于理解，易于实现
- 粒子数量越多渲染越慢，但效果越逼真

□ 挑战

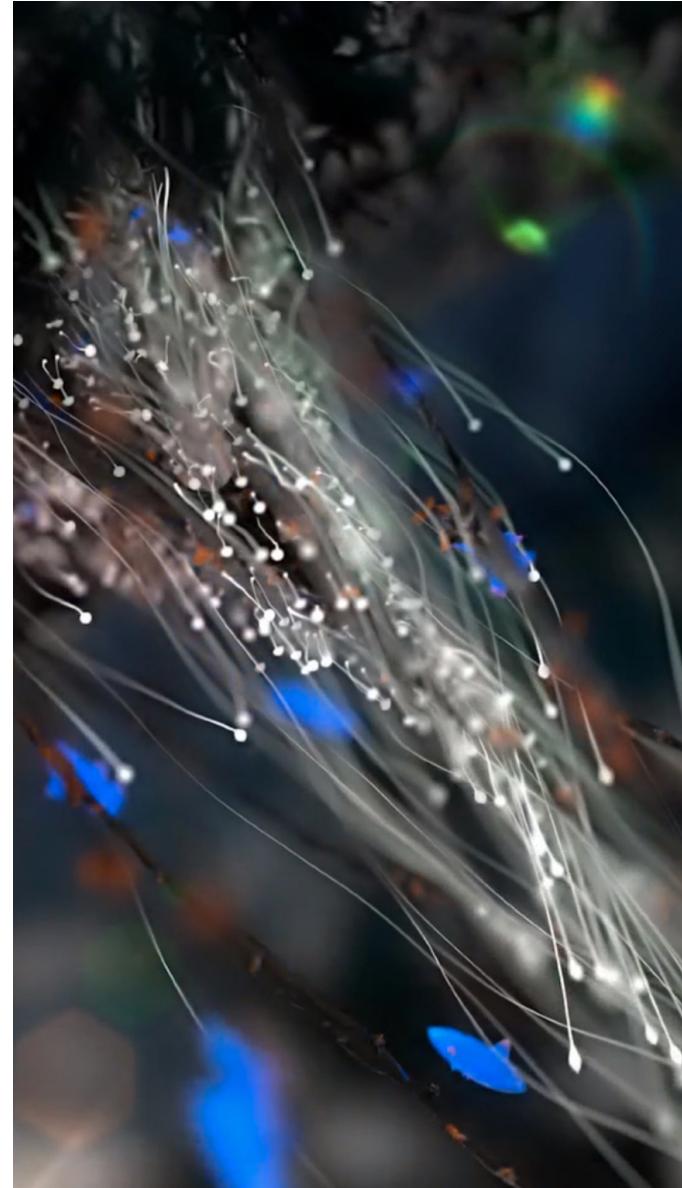
- 可能需要许多颗粒 (例如流体)
- 可能需要加速结构 (例如，快速找到最近的粒子以模拟相互作用)



# 粒子系统动画 (大致步骤)

对于动画中的每一帧

- [如果需要] 创建新粒子
- 计算每个粒子上的力
- 更新每个粒子的位置和速度
- [如果需要] 去除消亡的颗粒
- 渲染粒子



# 粒子系统中的各种作用力

□ 吸引力和排斥力 (attraction and repulsion forces)

- 重力 (gravity), 电磁力 (electromagnetism)...
- 弹簧力 (springs), 推进力 (propulsion)...

□ 阻尼力 (damping forces)

- 摩擦力 (friction), 空气阻力 (air drag), 粘度 (viscosity)...

□ 碰撞 (collisions)

- 墙 (walls), 容器 (containers), 固定对象 (fixed objects)...
- 动态对象 (dynamic objects), 角色身体部位 (character body parts)...

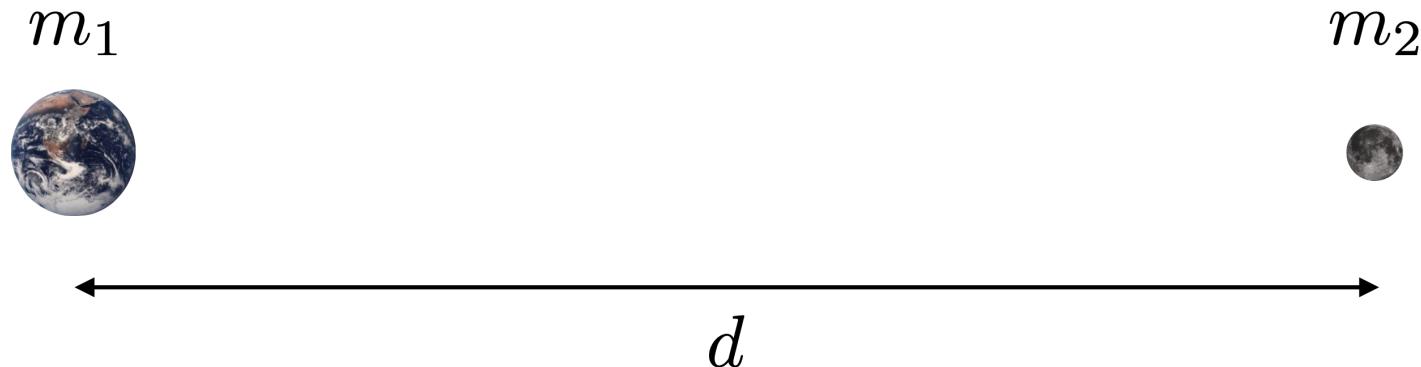
# 引力 (Gravitational attraction)

口牛顿万有引力定律

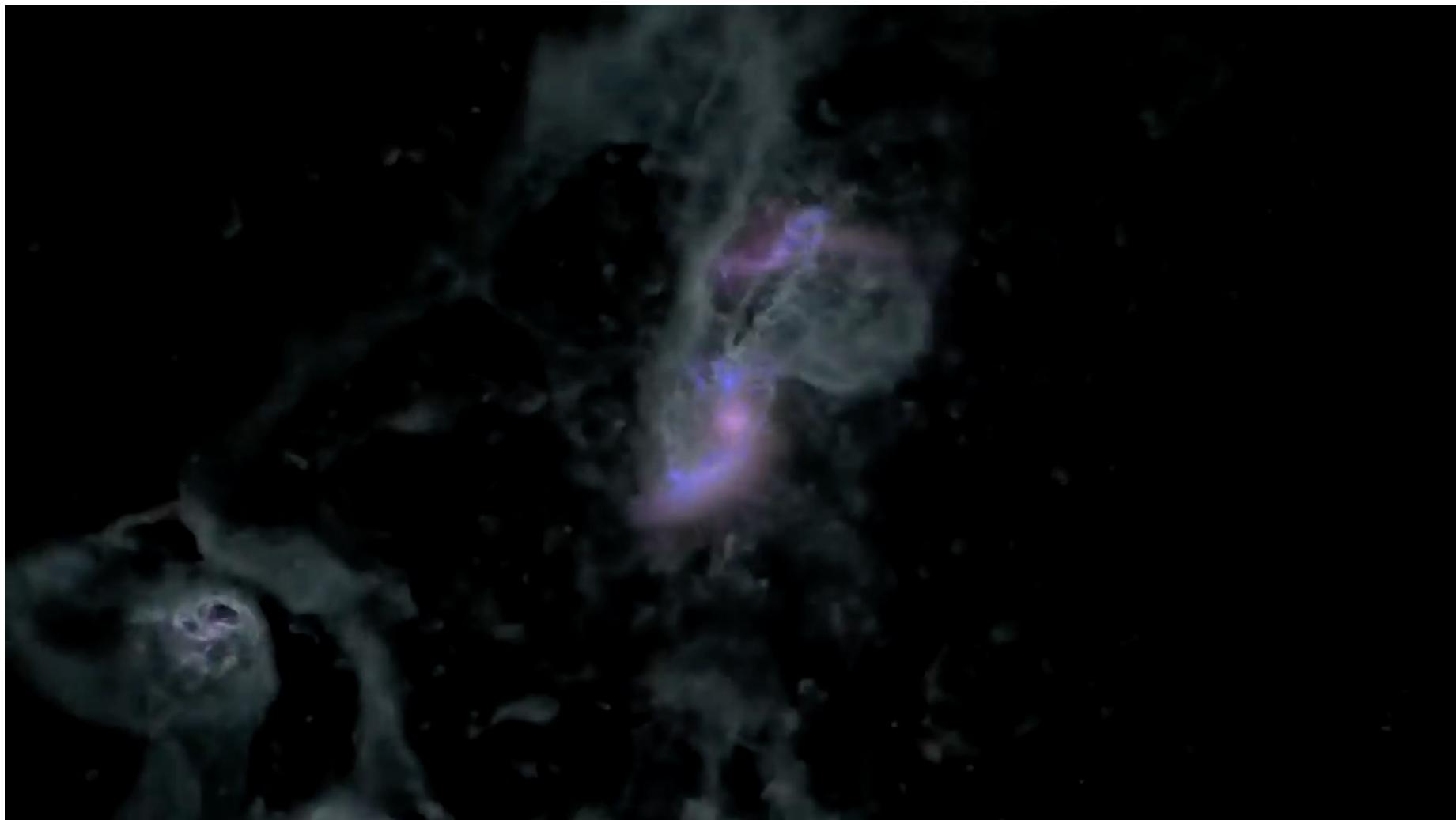
- 粒子之间的引力

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$G = 6.67428 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$$

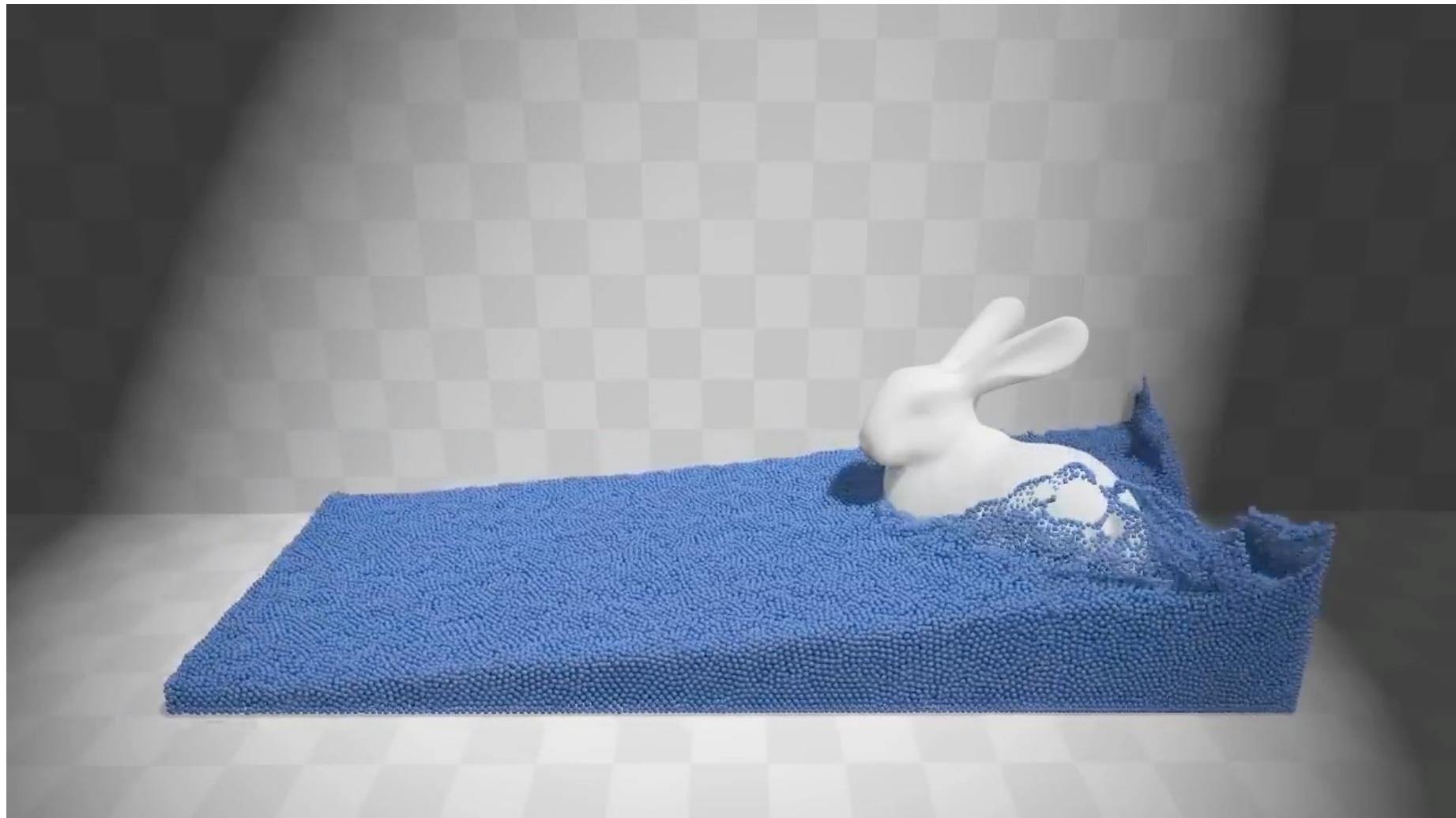


# 示例：银河系模拟



Disk galaxy simulation, NASA Goddard

# 示例：基于粒子的流体



# 示例：动物行为模拟

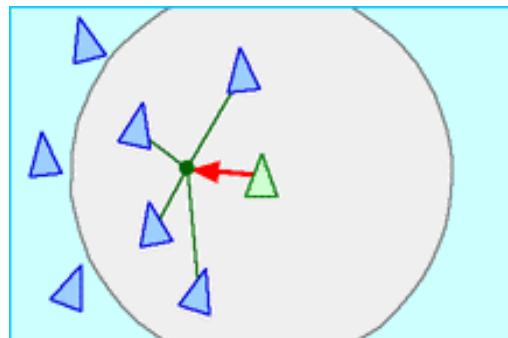
□ 将每只鸟建模为粒子

□ 受到非常简单的力：

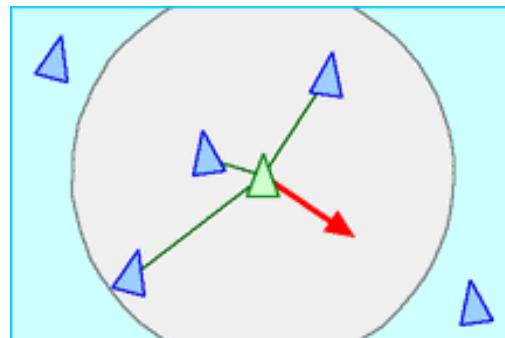
- 对邻居中心的吸引力 (attraction)
- 来自单个邻居的排斥力 (repulsion)
- 对准邻居的平均轨迹 (alignment)

□ 数值模拟大粒子系统的演化

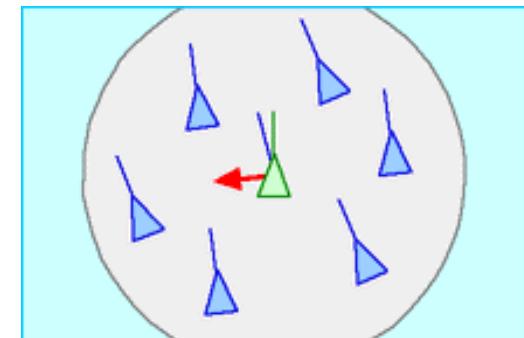
□ 突发的复杂行为 (也见于鱼类、蜜蜂等)



attraction



repulsion

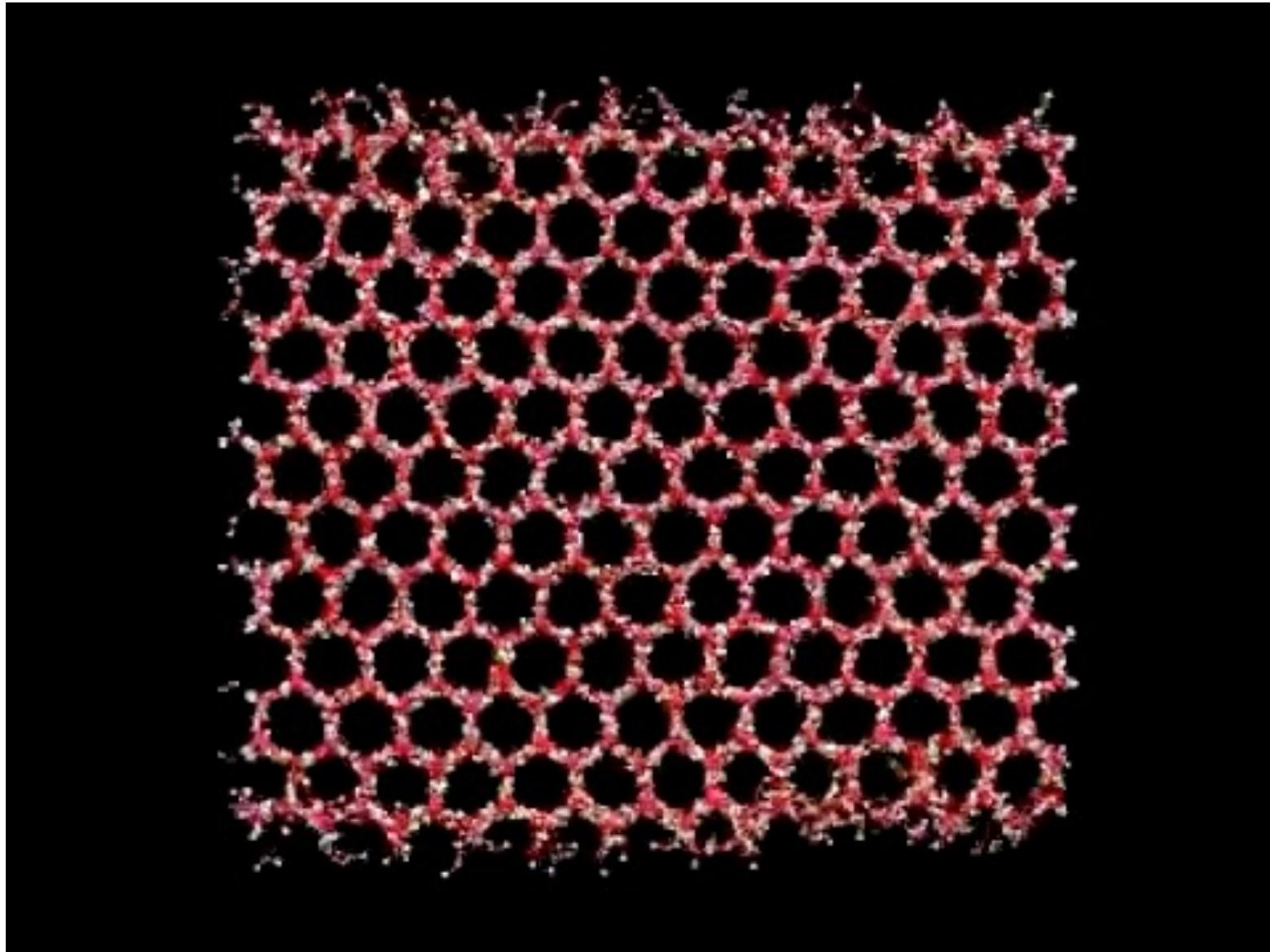


alignment

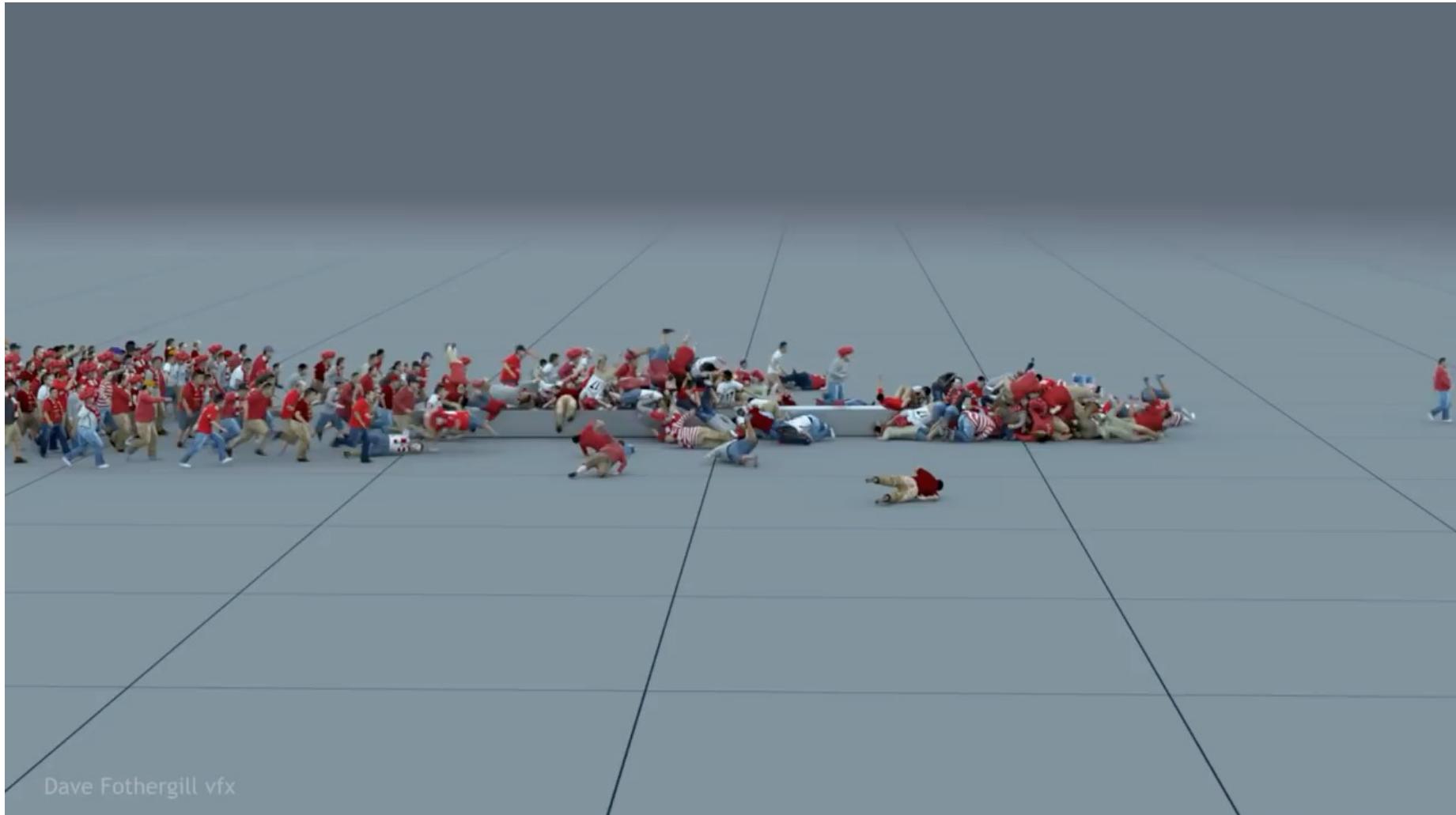
# 示例：鸟群运动



# 示例：分子动力学



# 示例：人群动力学



Dave Fothergill vfx

# 正向运动学

# Forward Kinematics

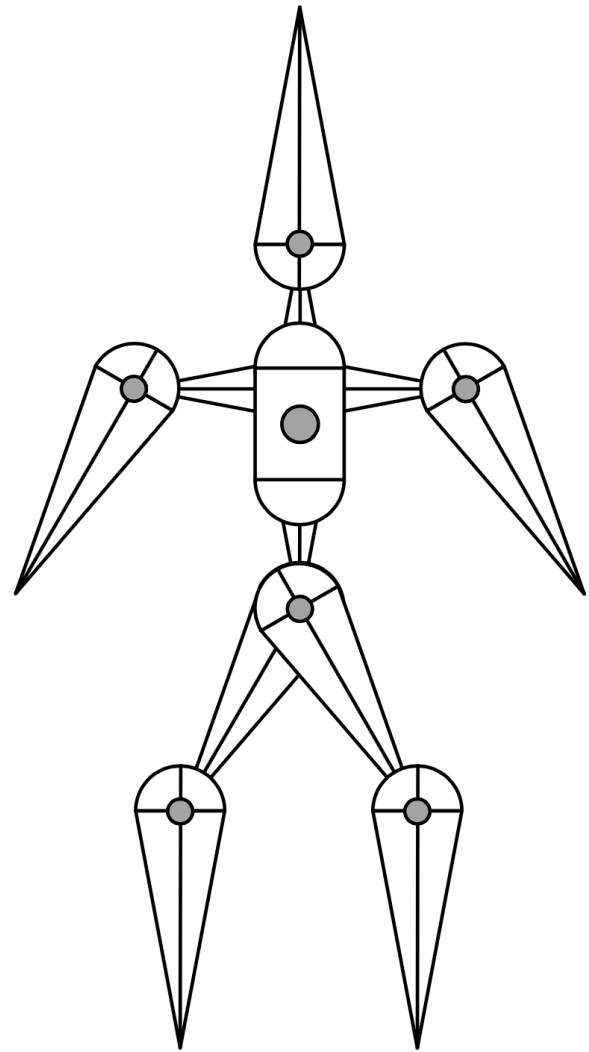
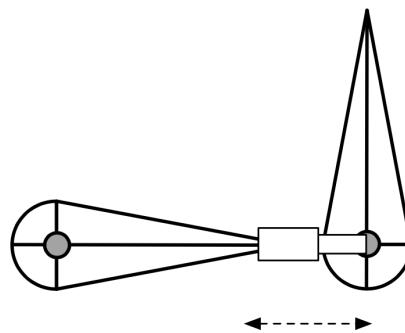
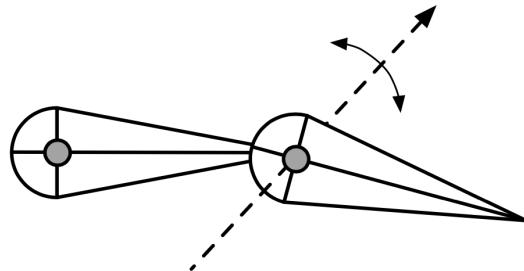
# 正向运动学

## 口铰接骨架 (Articulated skeleton)

- 拓扑 (什么连接到什么)
- 关节的几何关系
- 树状结构 (不存在循环)

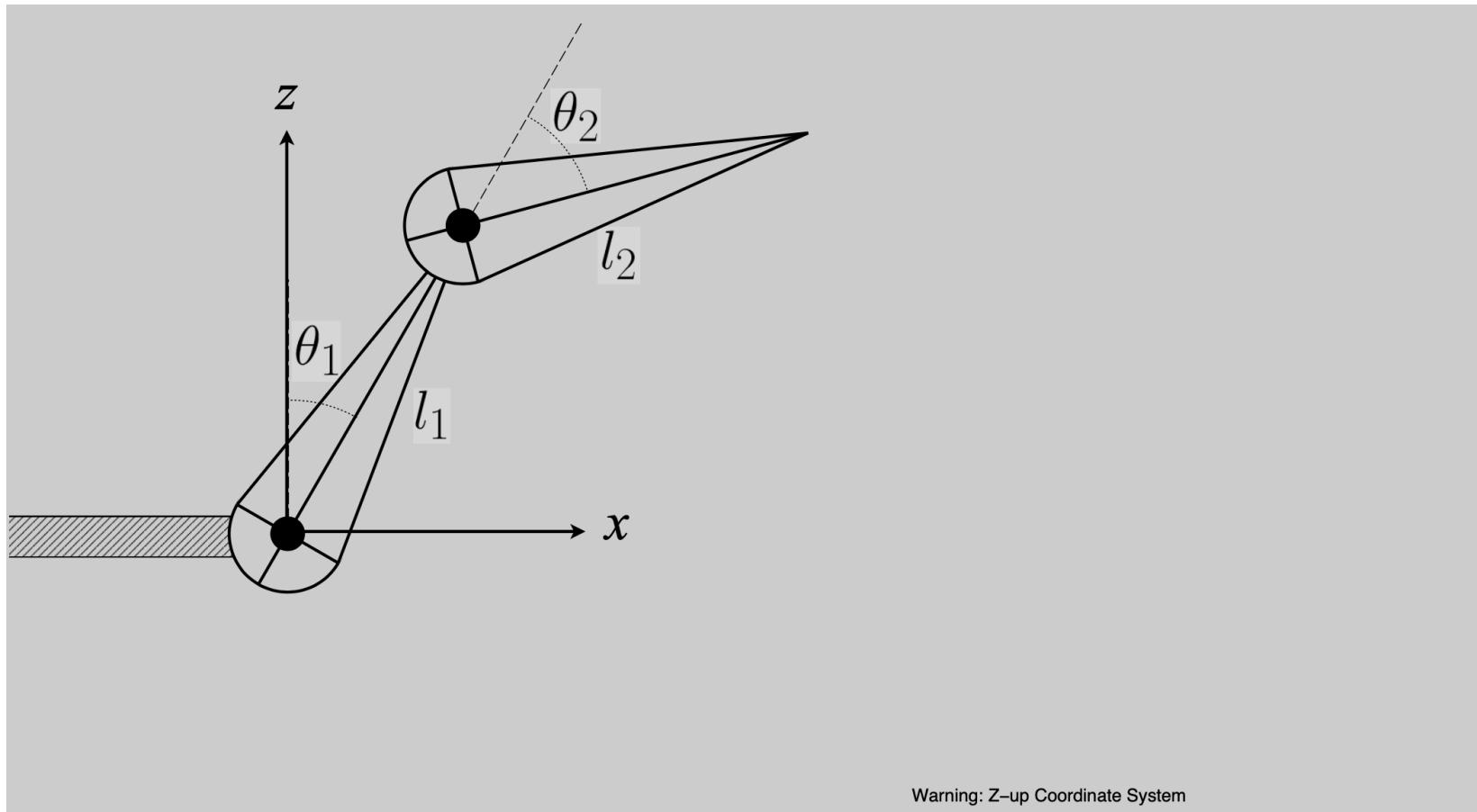
## 口连接类型 (Joint types)

- 销 (Pin, 1D 旋转)
- 球 (Ball, 2D 旋转)
- 棱镜关节 (Prismatic joint, 平移)



# 正向运动学

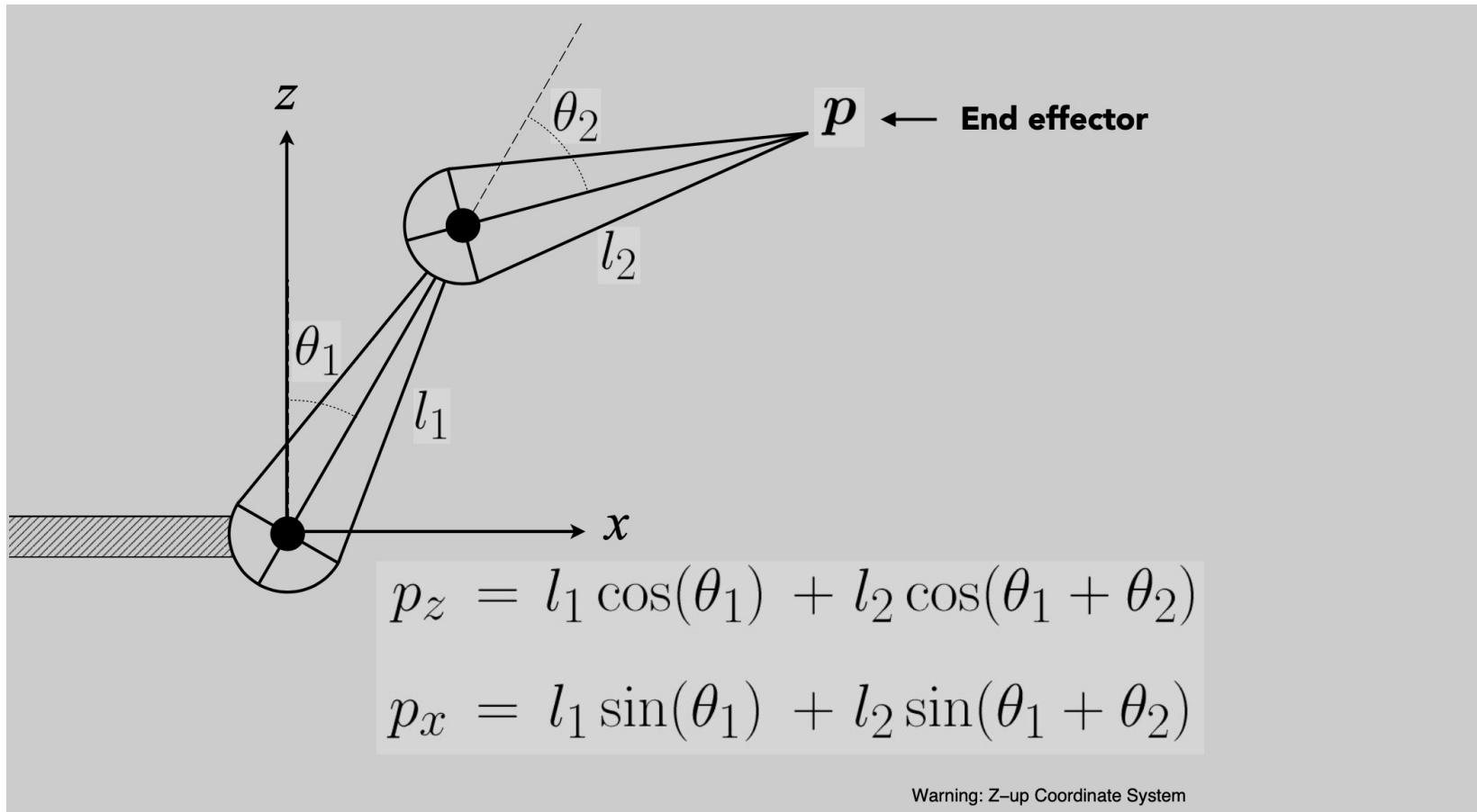
口示例：2D 中的简单双节臂



Warning: Z-up Coordinate System

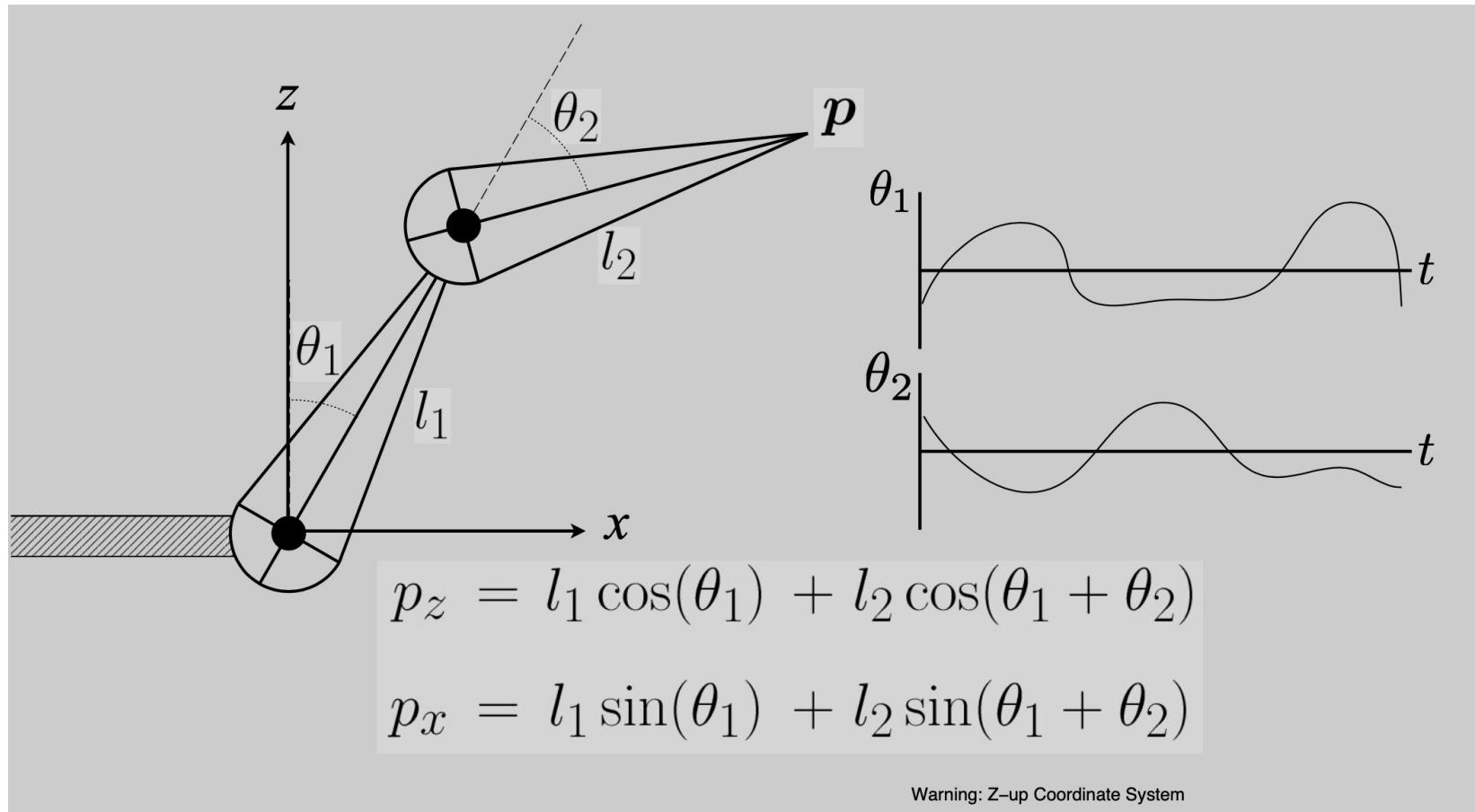
# 正向运动学

口基于提供的角度，计算机确定末端的位置  $p$

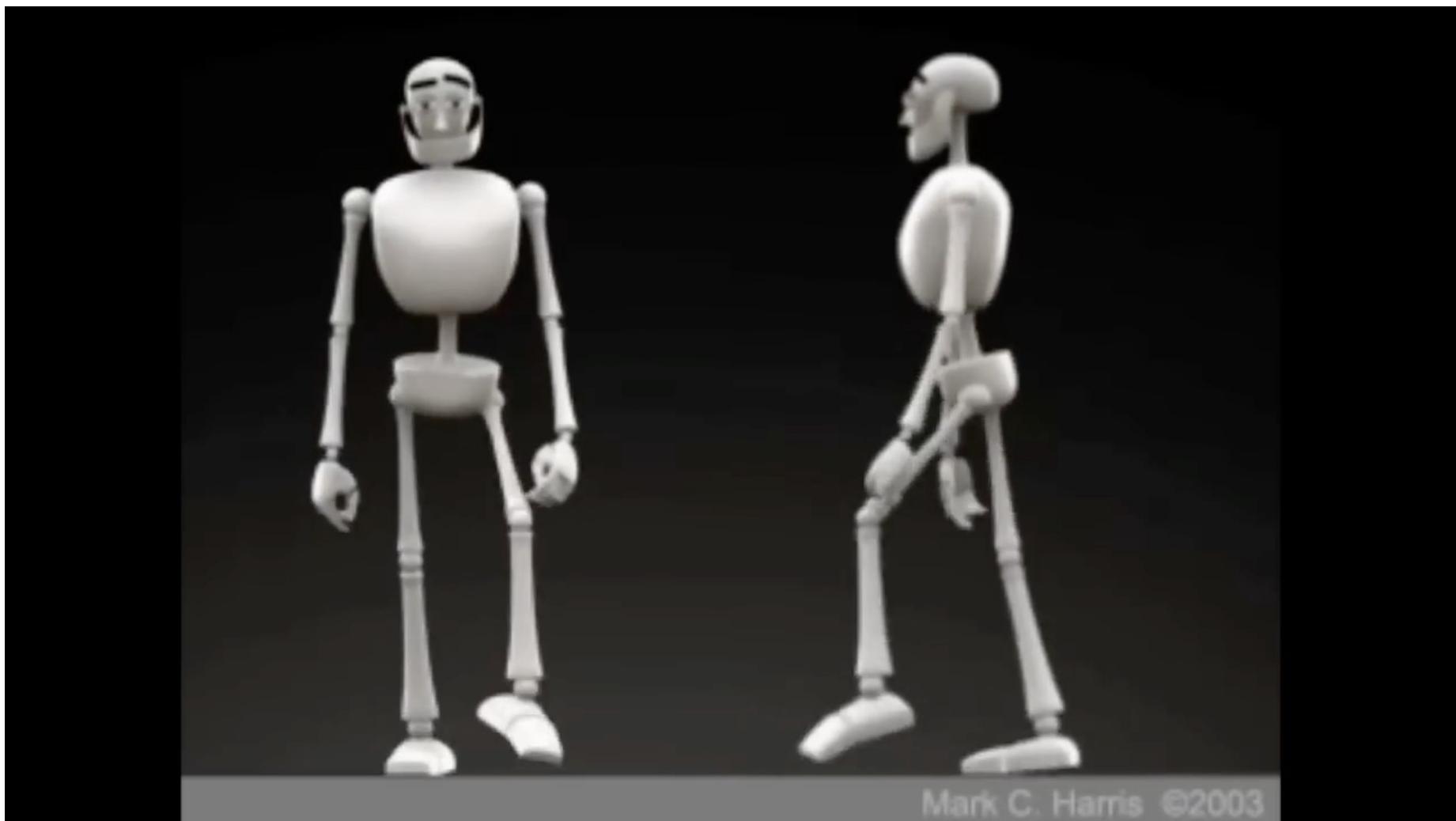


# 正向运动学

动画被描述成参数为角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的时间函数



# 步行周期



Mark C. Harris ©2003

# 运动学的优点和缺点

## 口优点

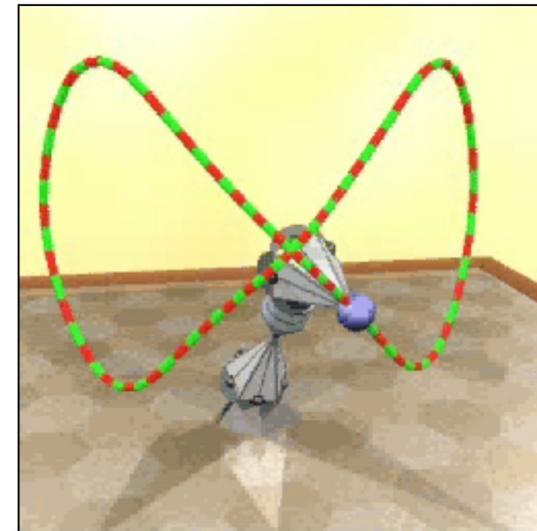
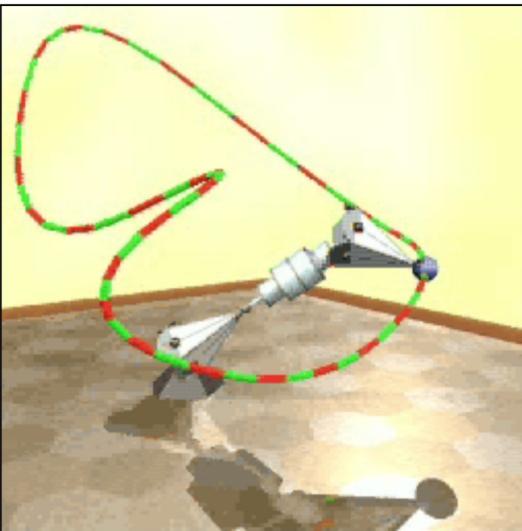
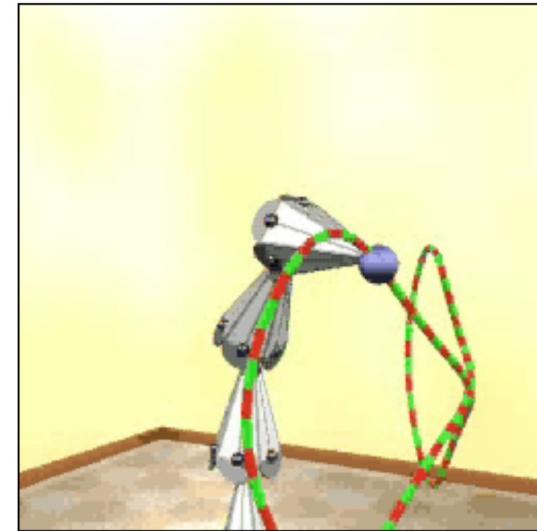
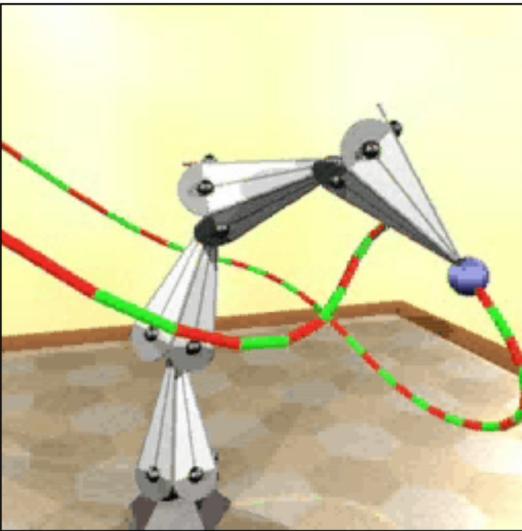
- 直接控制非常方便
- 实现也很简单

## 口缺点

- 动画可能与物理规律不一致
- 艺术家可能需要大量时间调整角度

# 逆向运动学 Inverse Kinematics

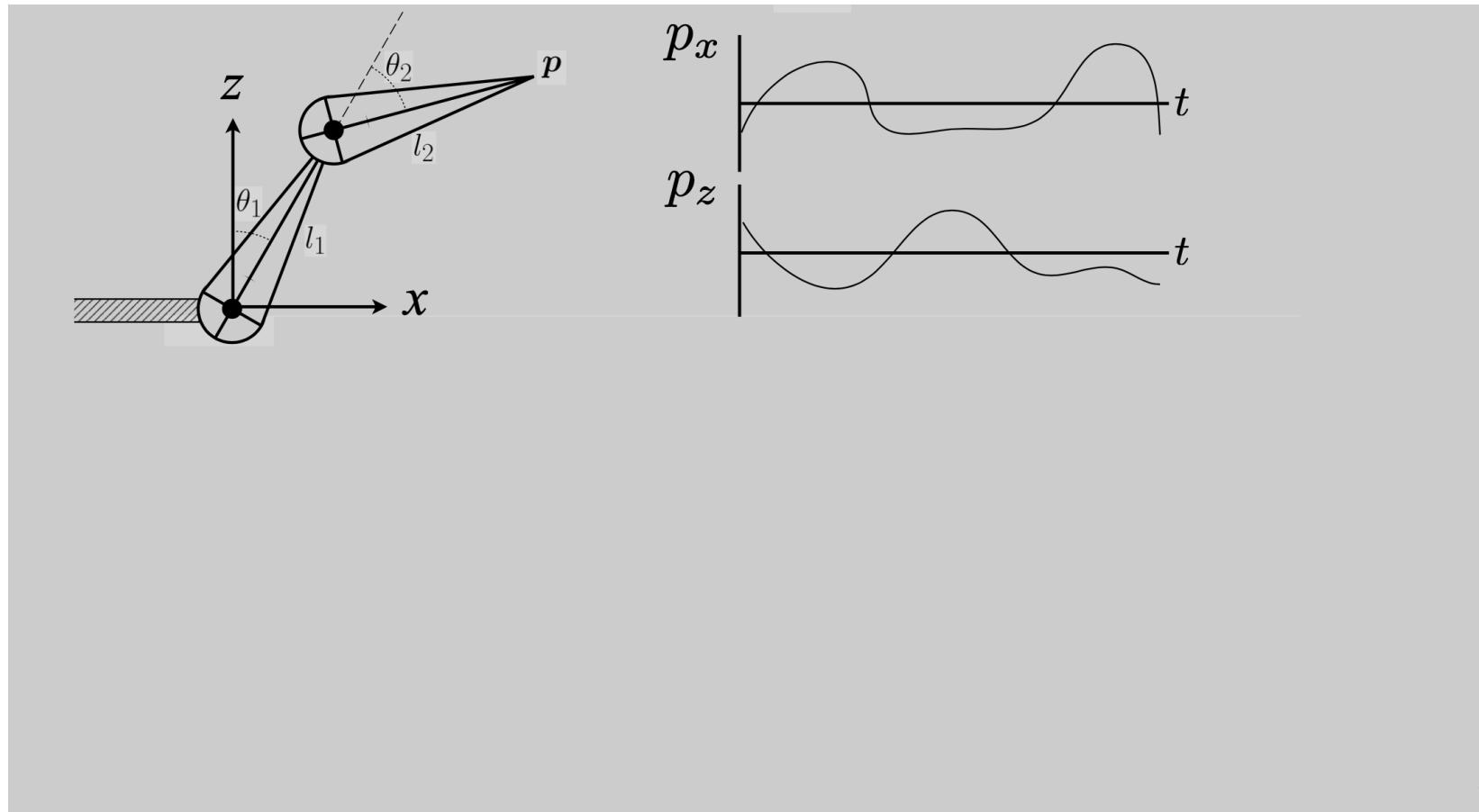
# 逆向运动学



Egon Pasztor

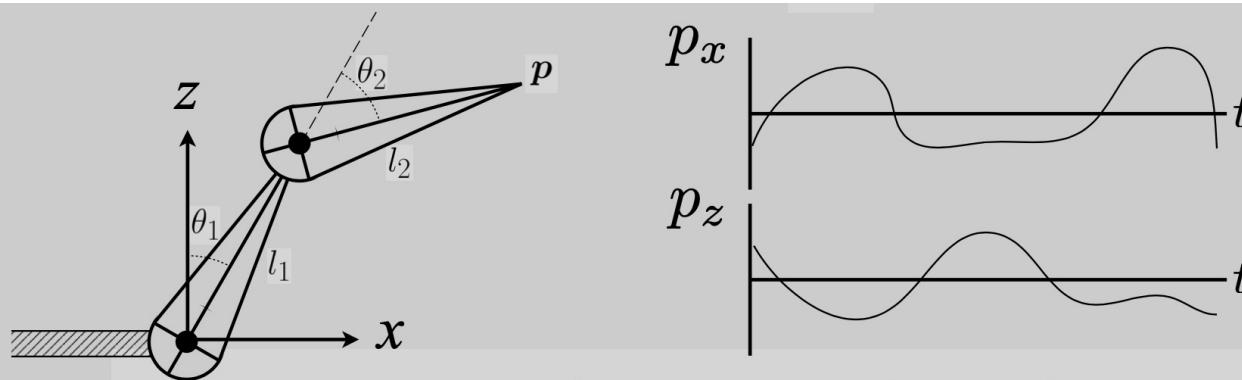
# 逆向运动学

口基于提供的末端位置  $p$  的轨迹，计算机确定满足约束的关节角度



# 逆向运动学

直接逆向运动学：对于双节臂，可以解析地求解参数



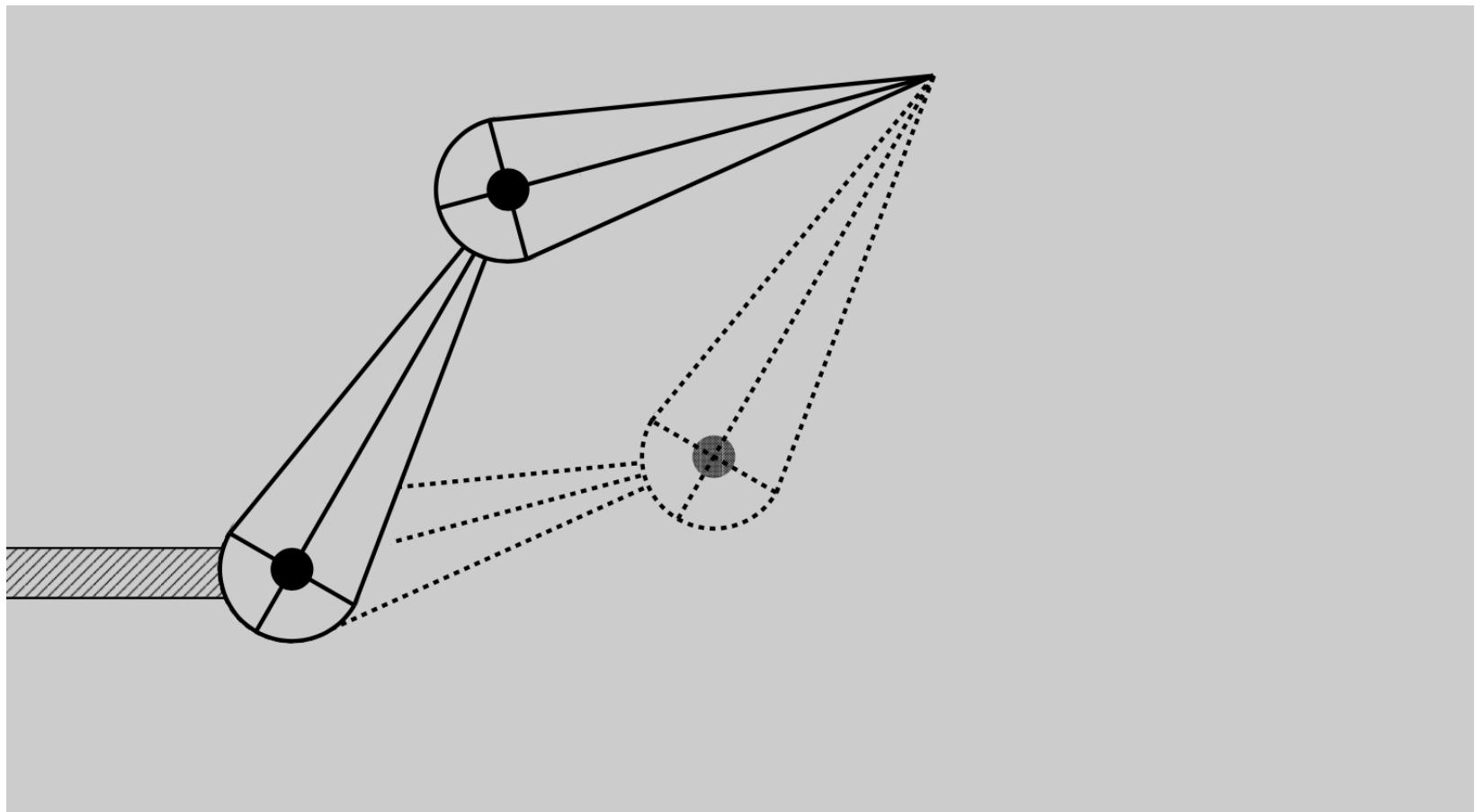
$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{p_z^2 + p_x^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right)$$

$$\theta_1 = \frac{-p_z l_2 \sin(\theta_2) + p_x (l_1 + l_2 \cos(\theta_2))}{p_x l_2 \sin(\theta_2) + p_z (l_1 + l_2 \cos(\theta_2))}$$

# 逆向运动学

□为什么这个问题很难解决？

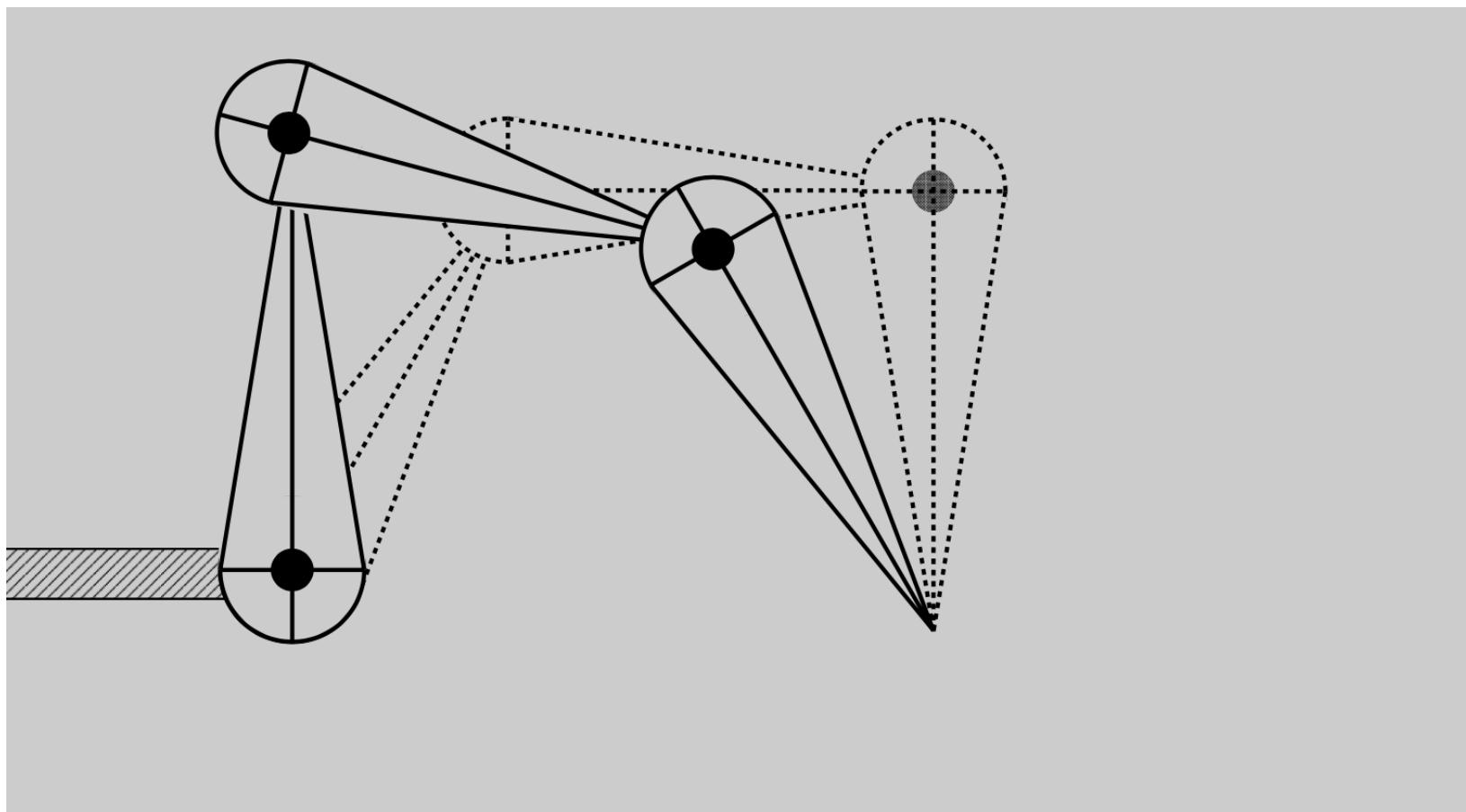
- 存在多组解



# 逆向运动学

□为什么这个问题很难解决？

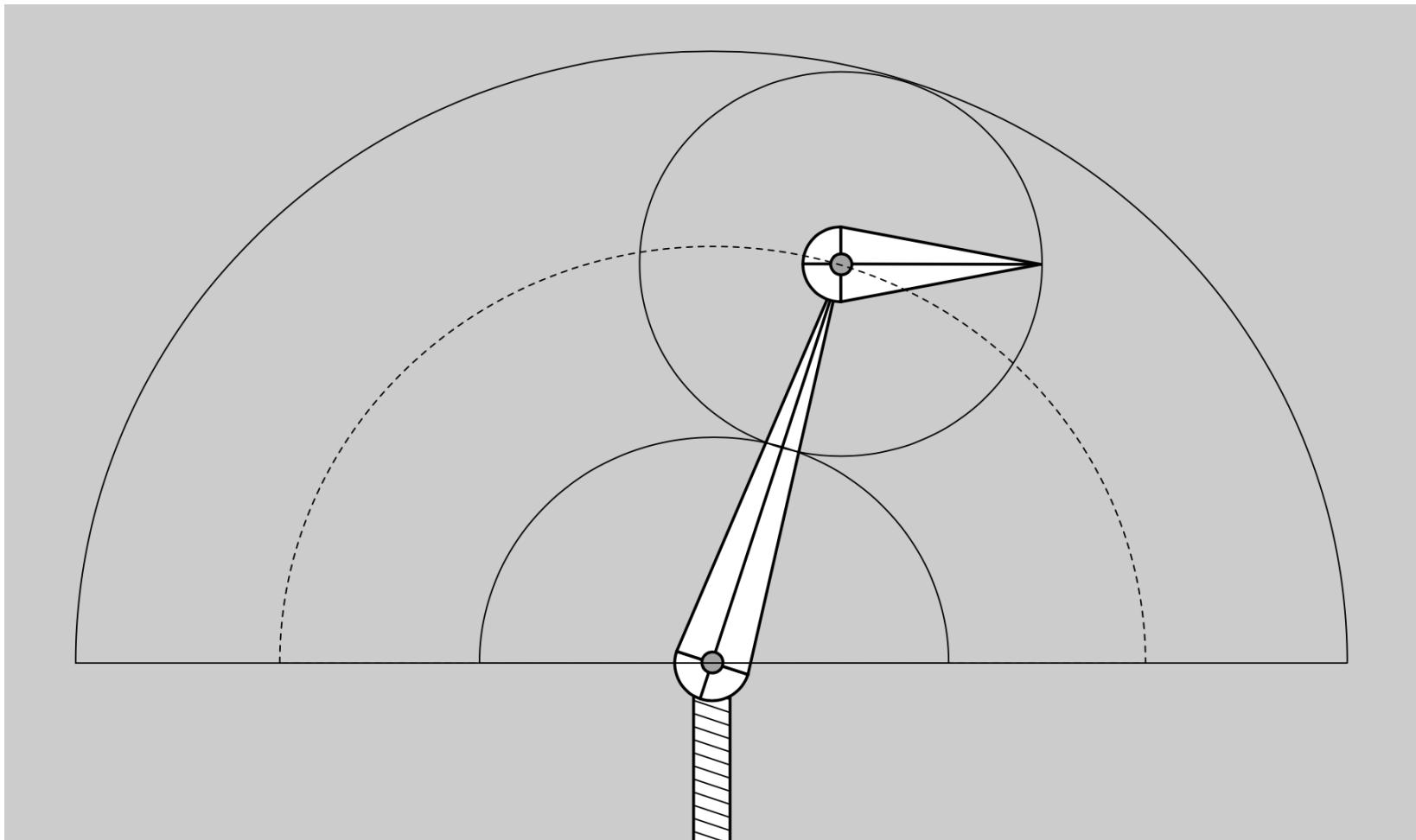
- 存在多组解



# 逆向运动学

为什么这个问题很难解决？

- 可能不存在解 (尖端只可能出现在最外面两个半圈)

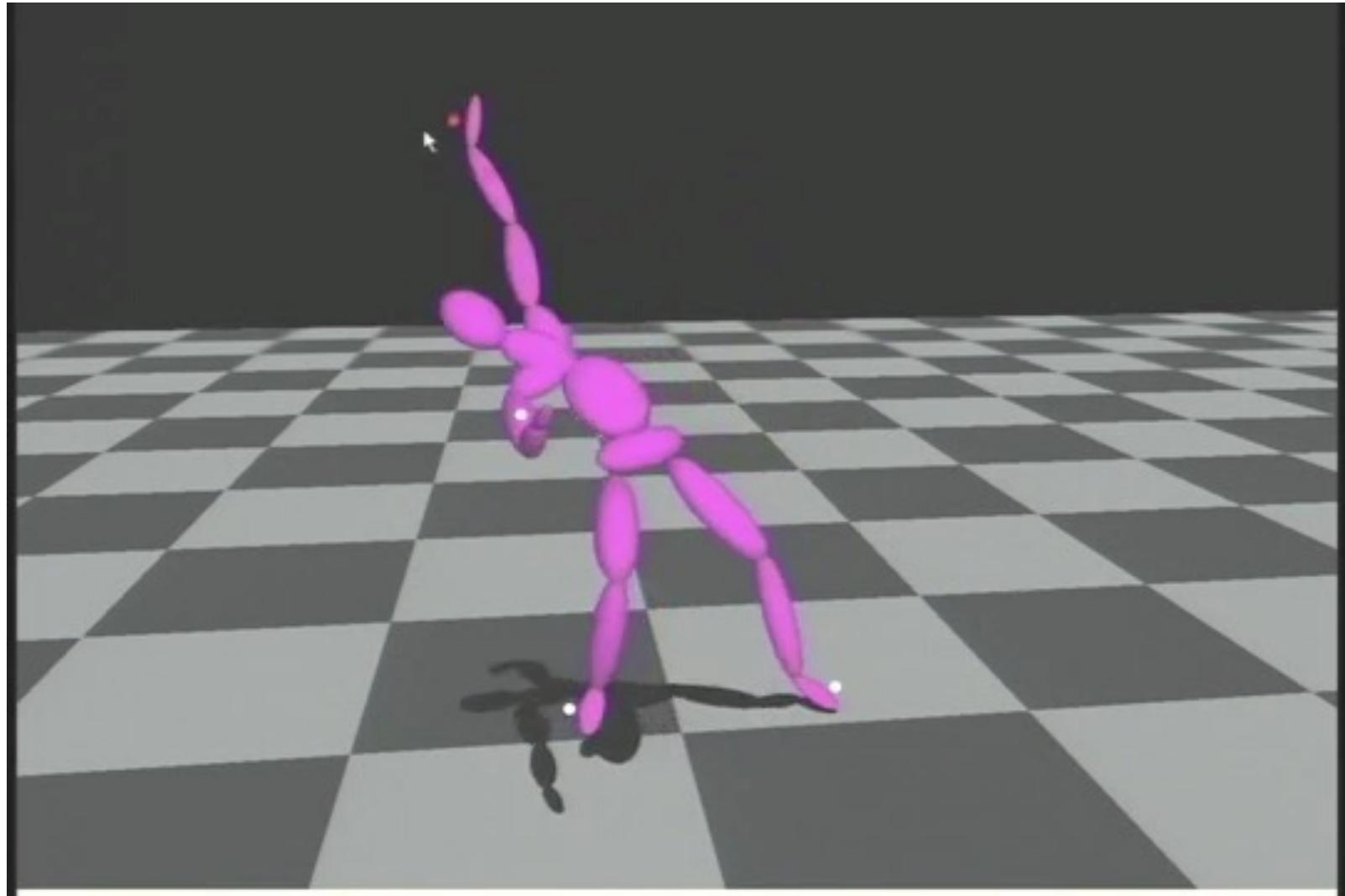


# 逆向运动学

口一般的 N-link 逆向运动学问题的数值解法

1. 选择初始配置
2. 定义误差度量 (例如, 目标和当前位置之间的距离的平方)
3. 计算配置函数的误差梯度
4. 应用梯度下降 (或牛顿法或其他优化程序)

# 基于风格的逆向运动学

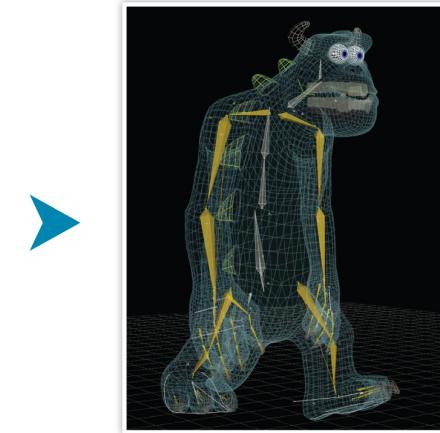
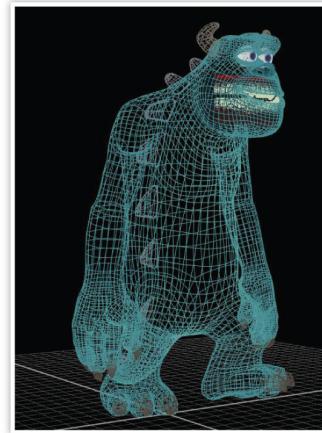


Grochow et al., Style Based Inverse Kinematics

绑定 & 蒙皮  
Rigging & Skinning

# 绑定 Rigging

口 绑定给模型创造一个骨骼系统，  
利用骨骼带动模型运动



口 可以更快速、直观地修改姿势 (pose)、变形  
(deformation)、表情 (expression) 等

- 类似木偶上的绳子
- 捕获有意义的角色变换
- 因角色而异

口 创建成本高昂

- 手动操作
- 需要艺术和技术方面的训练

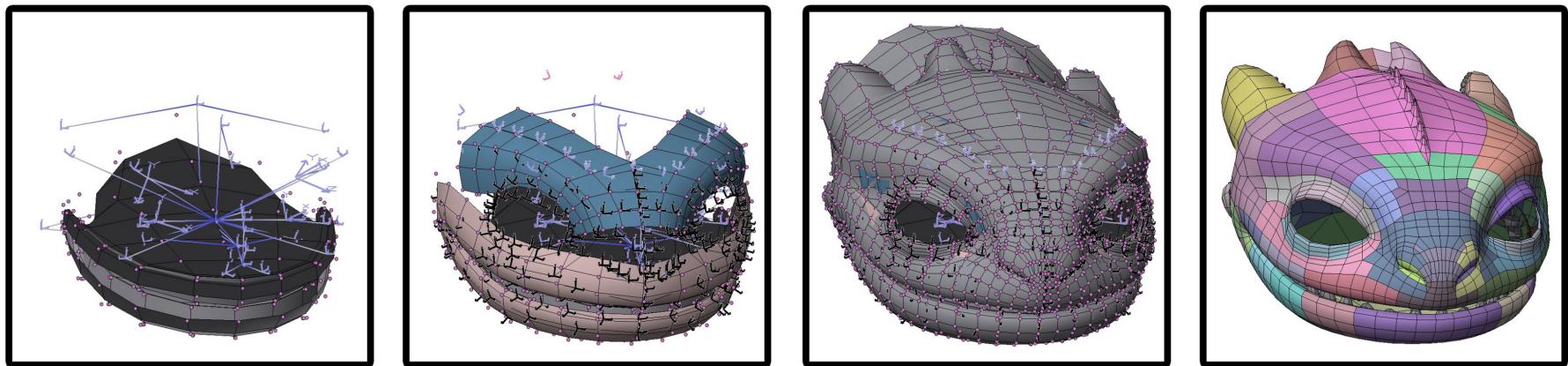


# 绑定 Rigging

- 首先创建一个模型，包括头部、身体、手臂和腿部等各部分
- 然后设置骨骼，即在模型内部创建一种结构，用来控制模型的动作，包括脊柱、手臂的骨骼、腿部的骨骼等



# 基于绑定的面部动画控制



Bailey, Watt, and O'Brien

# 基于绑定的面部动画控制

□效果测试

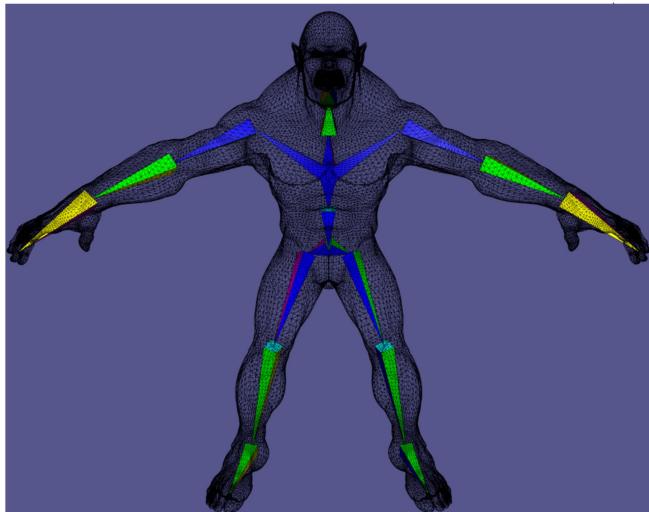


# 蒙皮 Skinning

□ 绑定创建了动画模型的骨骼结构，为了创造正确的动画，还需要将骨骼结构和模型的表面关联起来，即蒙皮

□ 涉及到一个“权重绑定”的过程，定义每个骨骼对模型表面每个顶点的影响程度

- 例如，手臂的骨骼对手臂附近的皮肤影响很大，但对脚部的皮肤影响较小



Bone transformations

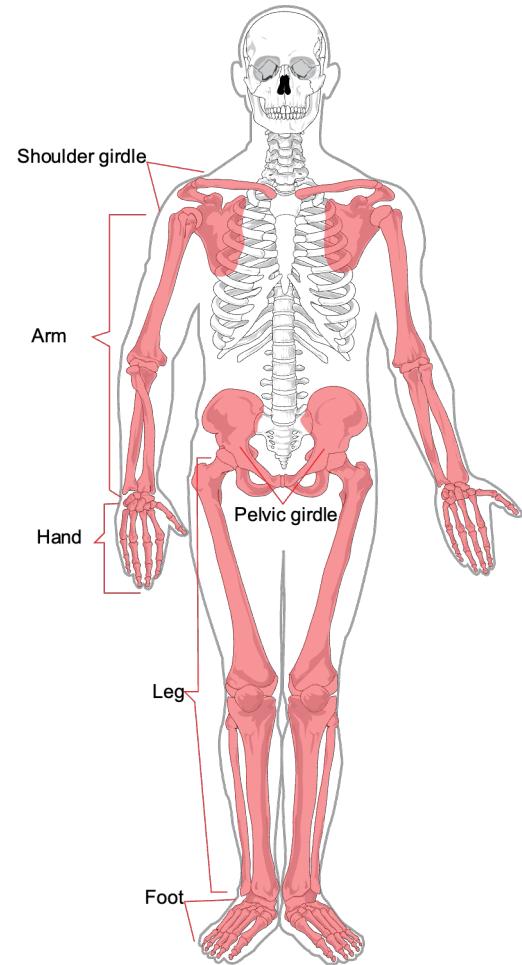
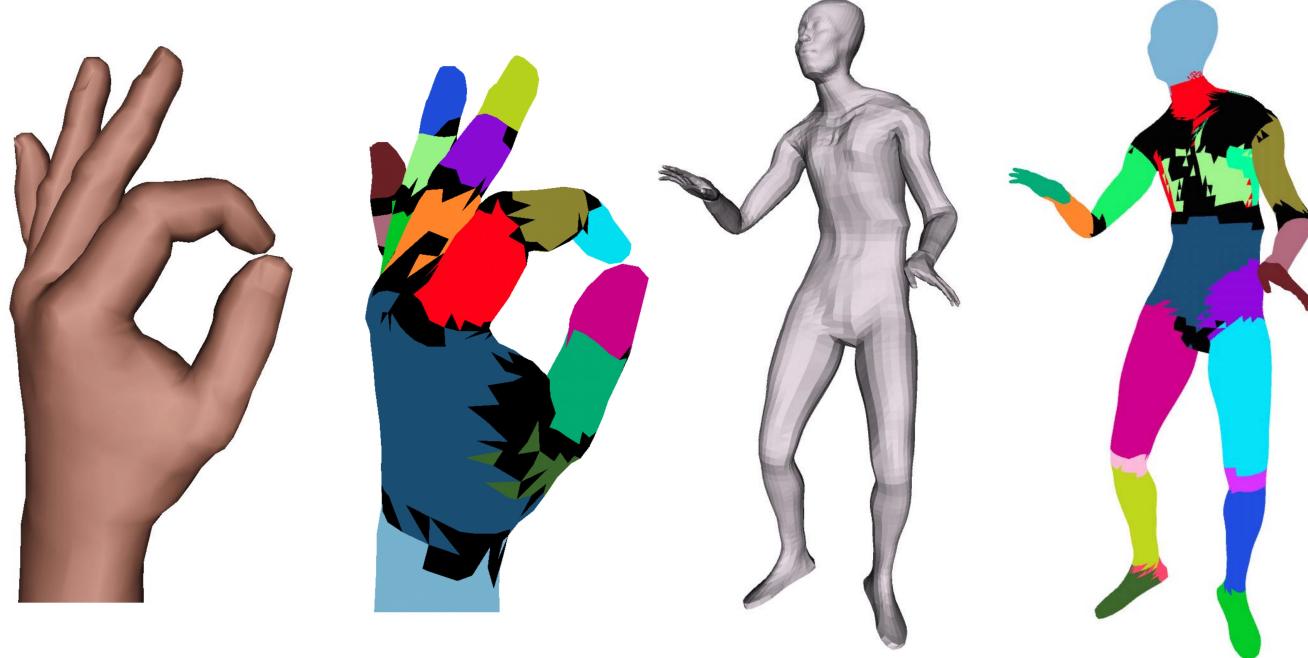


Skinning Weights

# 蒙皮

□需要推断皮肤如何随骨骼变换变形的

- 彩色的三角形附着在一个骨骼上
  - 皮肤点跟随骨骼(几乎刚性)旋转
- 黑色的三角形附着在多个骨骼上
  - 皮肤根据骨骼的“加权组合”变形



# 蒙皮

## 骨骼动画与肌肉动画

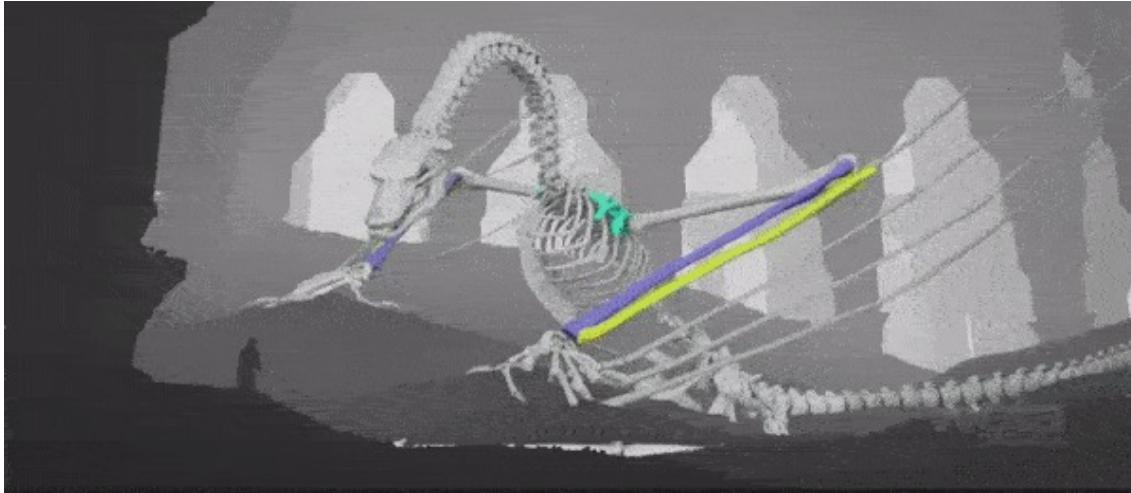


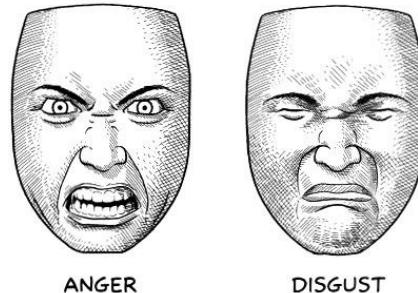
Image courtesy of Weta Digital

混合形状  
Blend shapes

# 混合形状

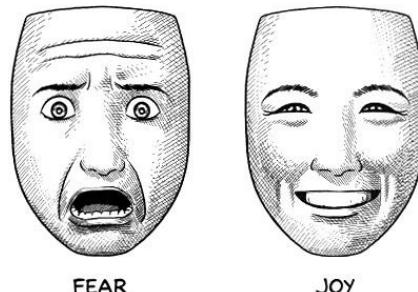
□并非所有变形都来自骨骼

□直接在曲面之间插值实现动作或表情的渐变



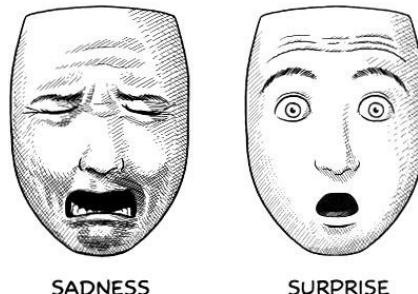
$$\text{ANGER} + \text{SURPRISE} = \text{"WHAT THE --?"}$$

$$\text{JOY} + \text{SURPRISE} = \text{AMAZEMENT}$$



$$\text{DISGUST} + \text{FEAR} = \text{HORROR}$$

$$\text{SADNESS} + \text{SURPRISE} = \text{DISAPPOINTMENT}$$



$$(\text{ANGER} \times \text{DISGUST}) + (\text{FEAR} - \text{JOY}) = \text{DESPERATION}$$

$$\sqrt{(\text{ANGER} - \text{FEAR})} + \text{SADNESS}^2 = \text{DEVASTATION}$$

$$(\text{JOY} + \text{SURPRISE})^2 = \text{JOY}^2 + \text{SURPRISE}^2 + 2 \cdot \text{JOY} \cdot \text{SURPRISE}$$

# 混合形状

口为一组面部表情建模：

- 最简单的方案：采用顶点位置的线性组合
- 样条曲线：随时间改变控制点的权重



# 动作捕捉

# Motion capture

# 动作捕捉

以数据驱动 (data-driven) 的方式创建动画序列

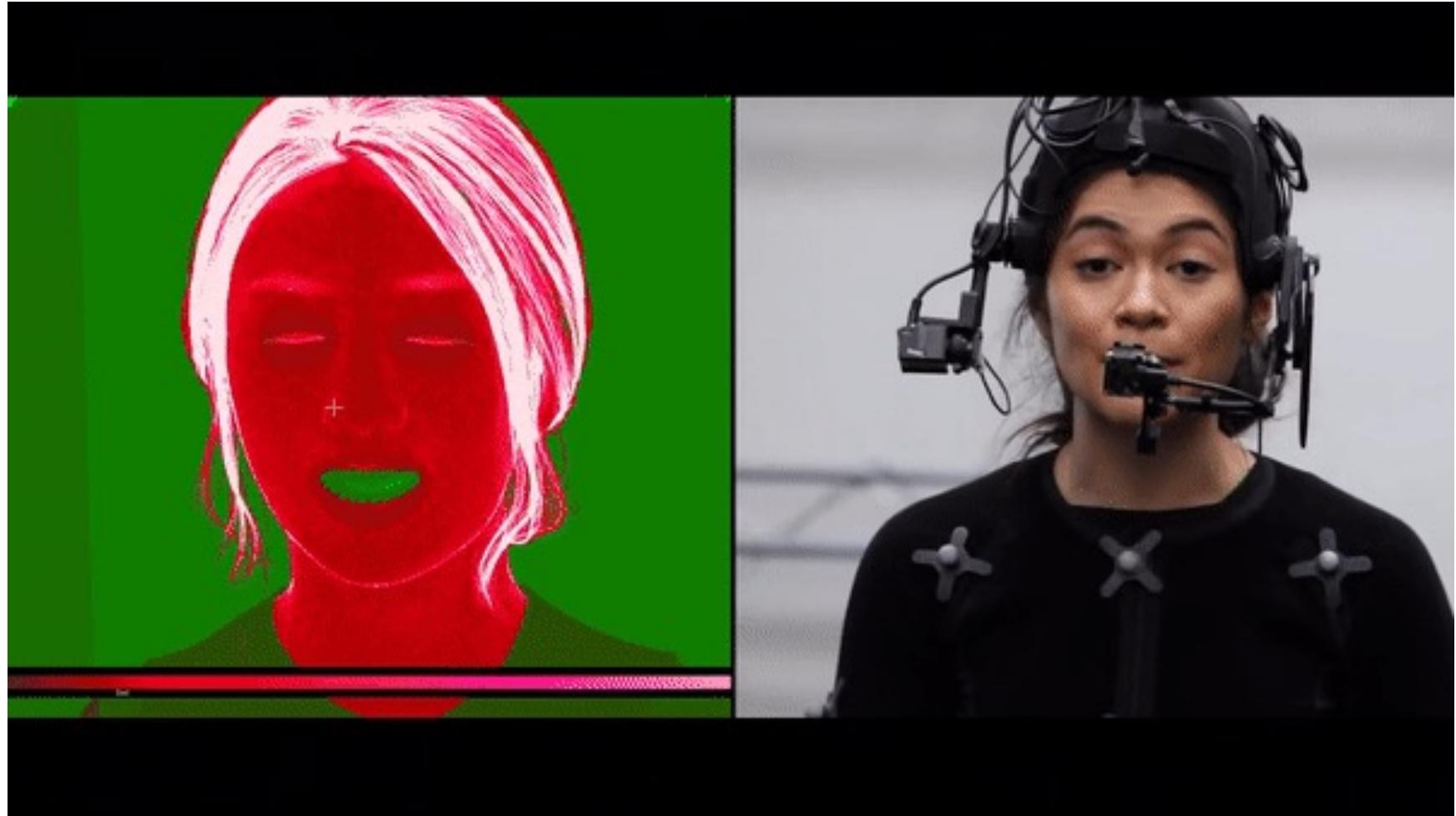
- 记录真实世界的表现 (例如活动的人的动作)
- 从收集的数据中提取以时间为参数的动作函数



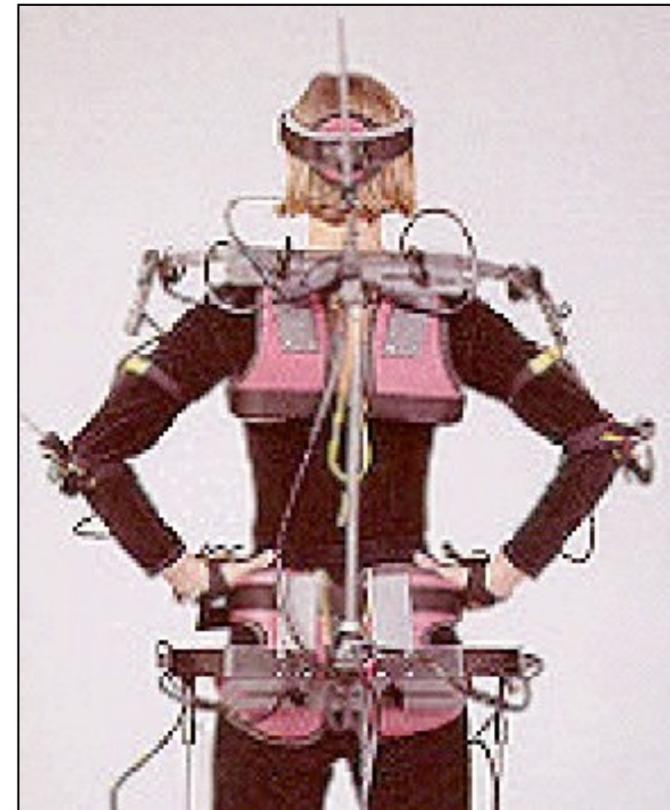
# 动作捕捉



# 动作捕捉



# 动作捕捉设备



## Optical

(More on following slides)

## Magnetic

Sense magnetic fields to  
infer position / orientation.  
Tethered.

## Mechanical

Measure joint angles directly.  
Restricts motion.

# 光学运动捕捉



附在运动者身上的反光标记

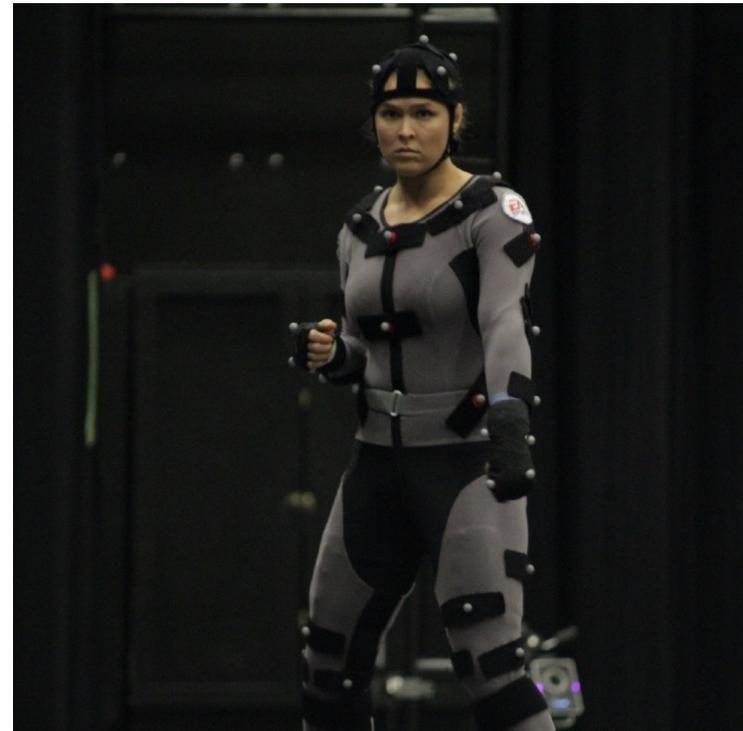


红外线照明和摄像头

- 在目标物体上贴标记点
- 通过多个摄像头进行三角测量定位
- 8个以上摄像头，240 Hz，难以处理遮挡

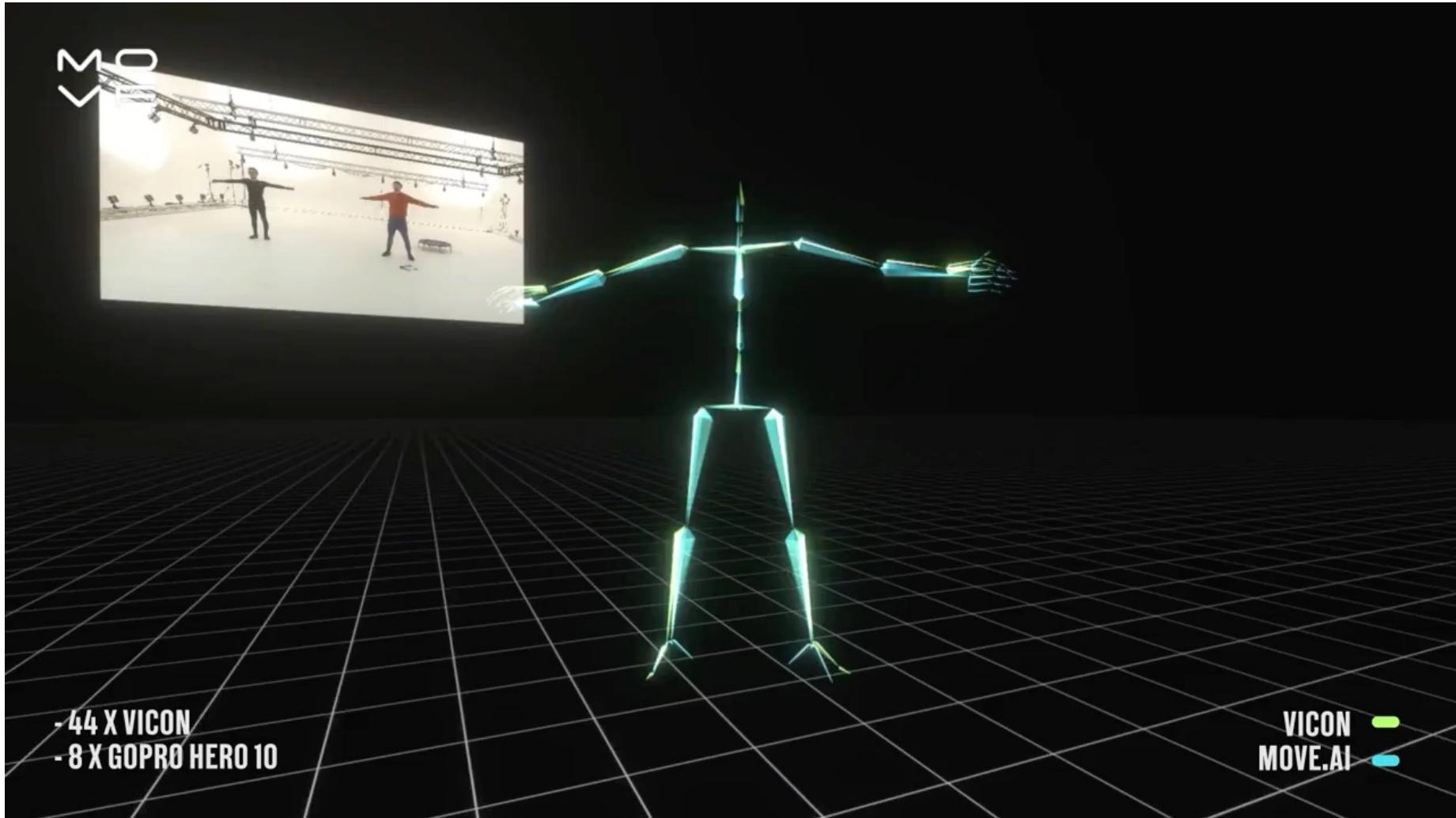
# 光学运动捕捉

□需要大量的设备



Ronda Roussey in Electronic Arts' motion capture studio

# 动作捕捉



# 面部动作捕捉



# 无标记运动捕捉

## □深度学习



Pink = Single-frame



Blue = Ours

# 面部动画的挑战

## 恐怖谷效应 (Uncanny valley)

- 在机器人和图形领域
- 当一个类人的 (humanoid) 物品与自然的、活生生的人非常相似，但不完全相同的时候 (即似人非人)，人们对其会产生一种奇怪的 (uncanny) 厌恶害怕的情绪反应

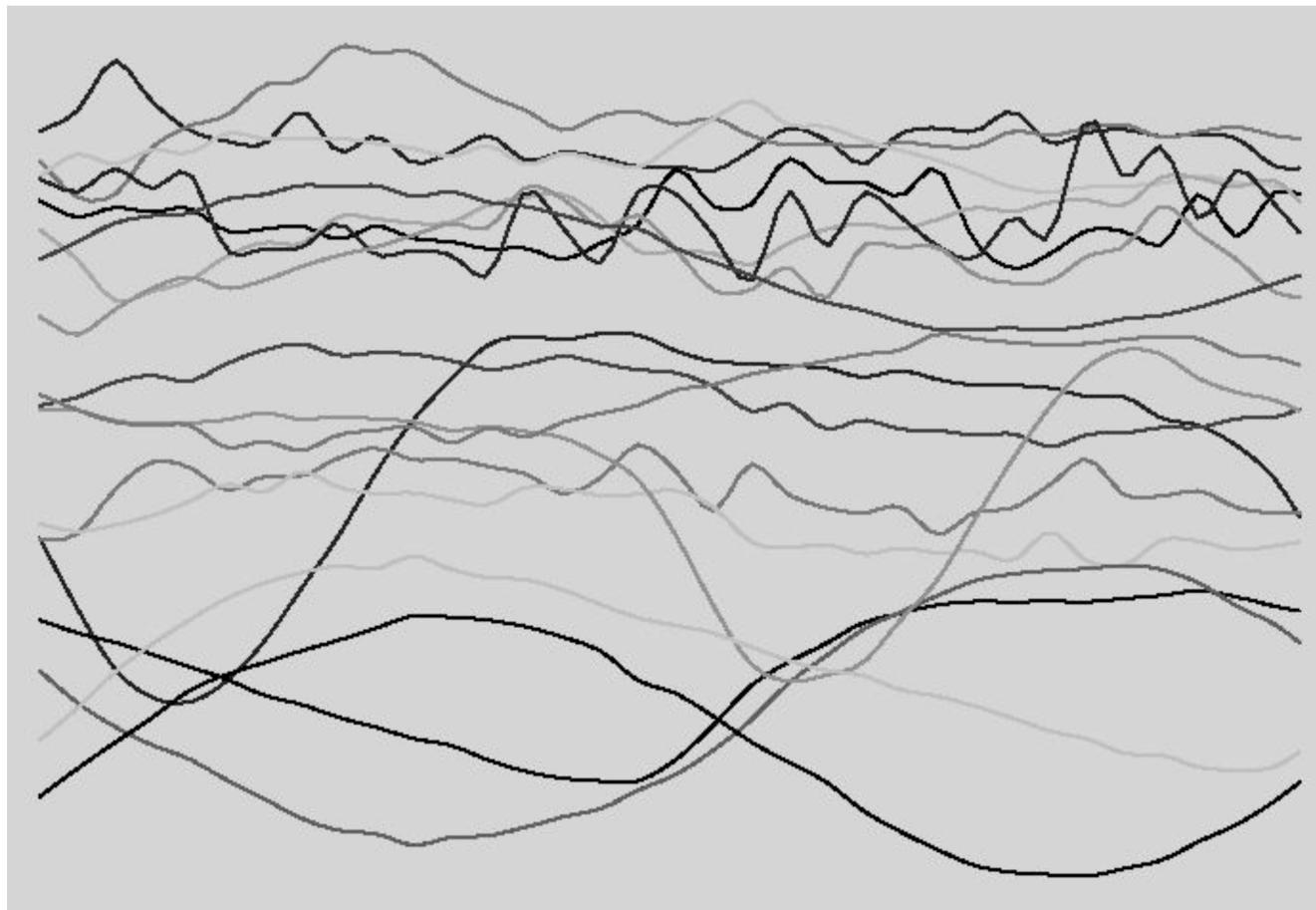


Cartoon.  
Brave, Pixar



Semi-realistic. Polar Express, Warner Bros.

# 动作数据



捕获的行走运动的曲线子集  
Witkin and Popovic, 1995

# 动作捕捉的优点和缺点

## 优点

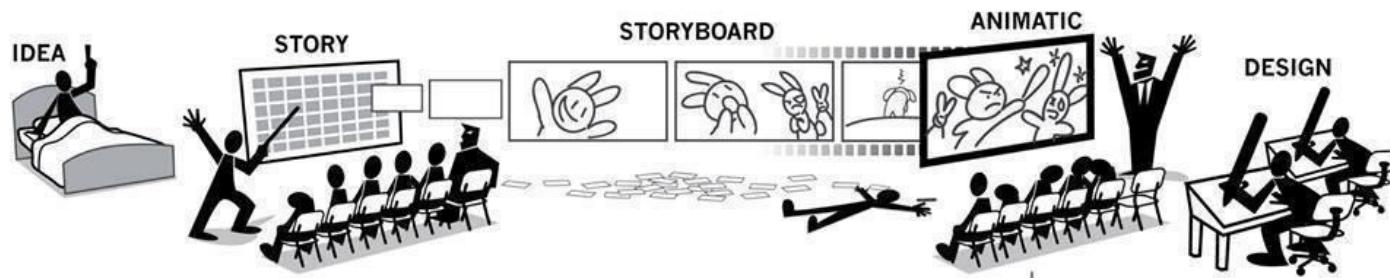
- 可以快速捕获大量真实数据
- 效果很真实

## 缺点

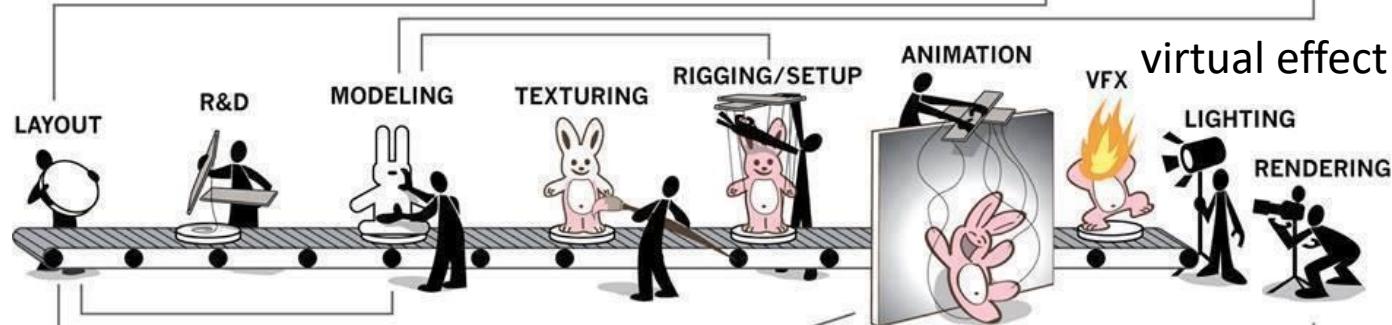
- 复杂而昂贵的设置
- 捕捉的动画可能无法满足实际需求 (遮挡、准确度等)，需要修改

# 3D 动画生产流程

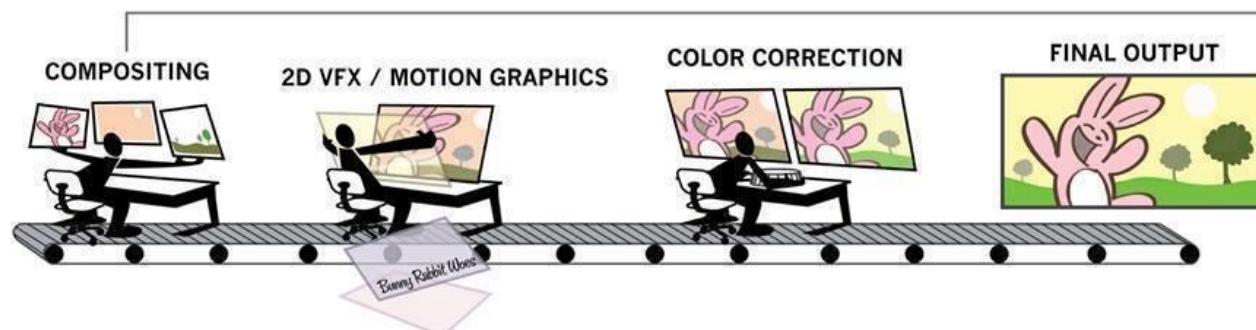
## PRE-PRODUCTION



## PRODUCTION



## POST-PRODUCTION





中山大學 软件工程学院  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF SOFTWARE ENGINEERING

谢谢

陈壮彬  
软件工程学院  
[chenzhb36@mail.sysu.edu.cn](mailto:chenzhb36@mail.sysu.edu.cn)