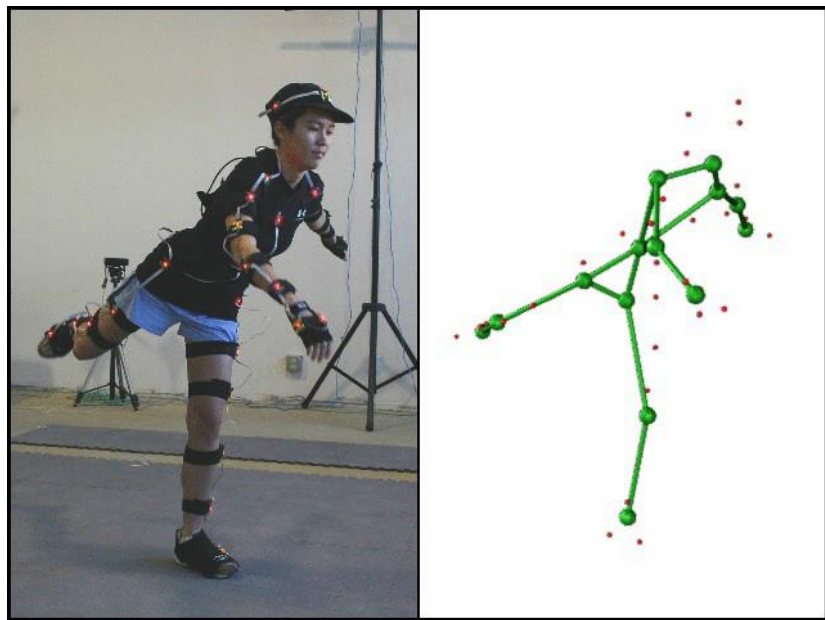


第九章 计算机动画

9.3 角色动画

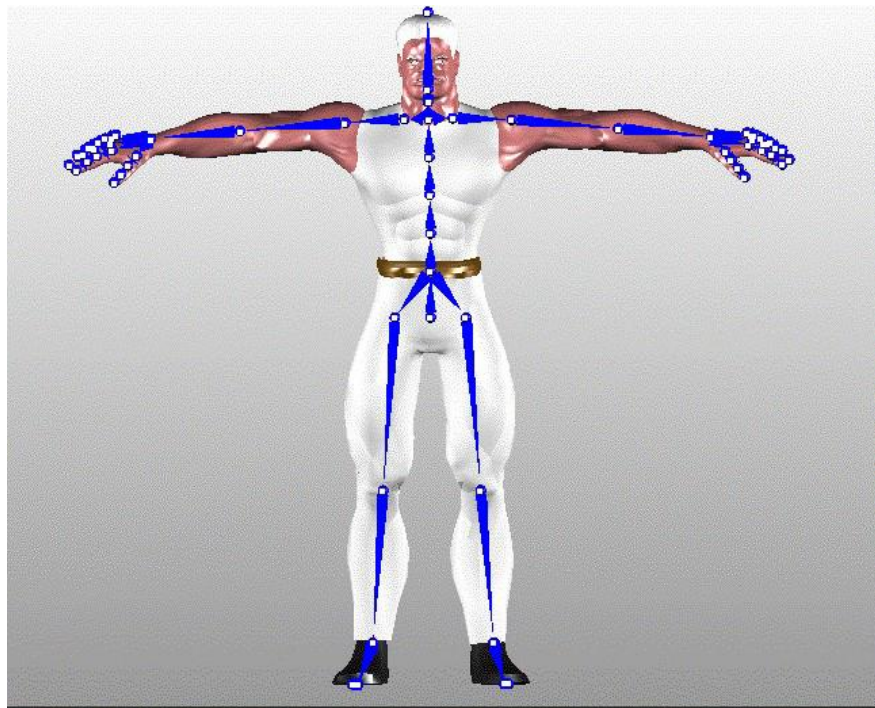
运动捕捉

- 人类运动的数字化
- 跟踪传感器的运动
- 将运动用于虚拟角色



蒙皮 (Rigging)

- 决定角色的形体表面如何跟随骨骼运动
- 骨骼运动时，各定点运动的幅度



运动编辑

- 将捕捉到的运动运用到不同场景
- 需要将运动数据进行调整



(a) Normal walk



(b) Tired walk



(c) $s = 0.5$



(d) $s = 2.0$

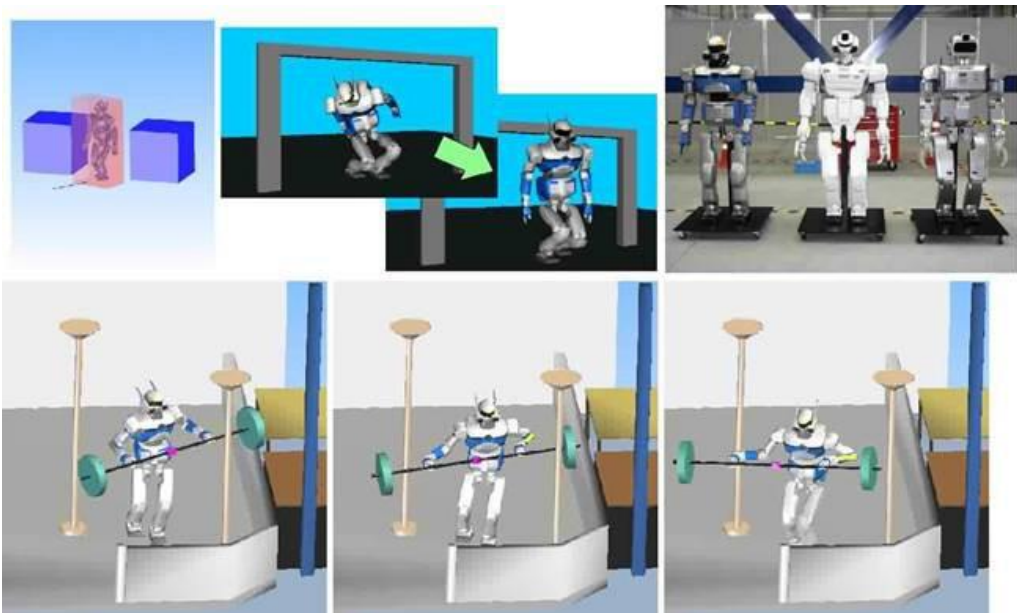
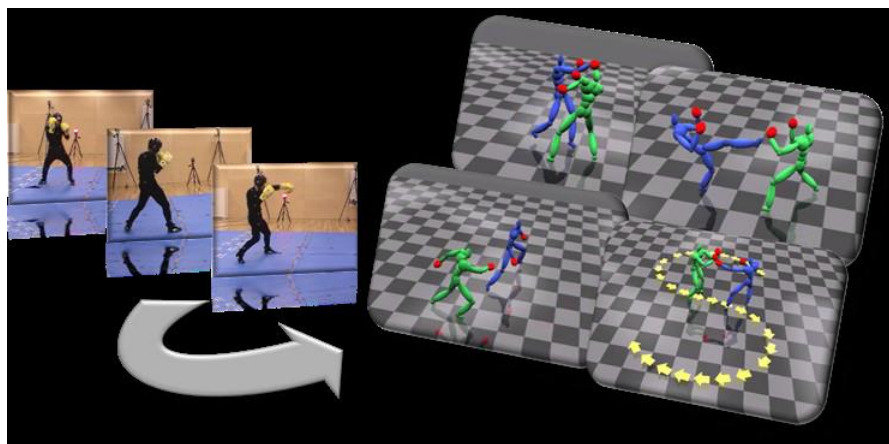


(e) $s = -0.5$



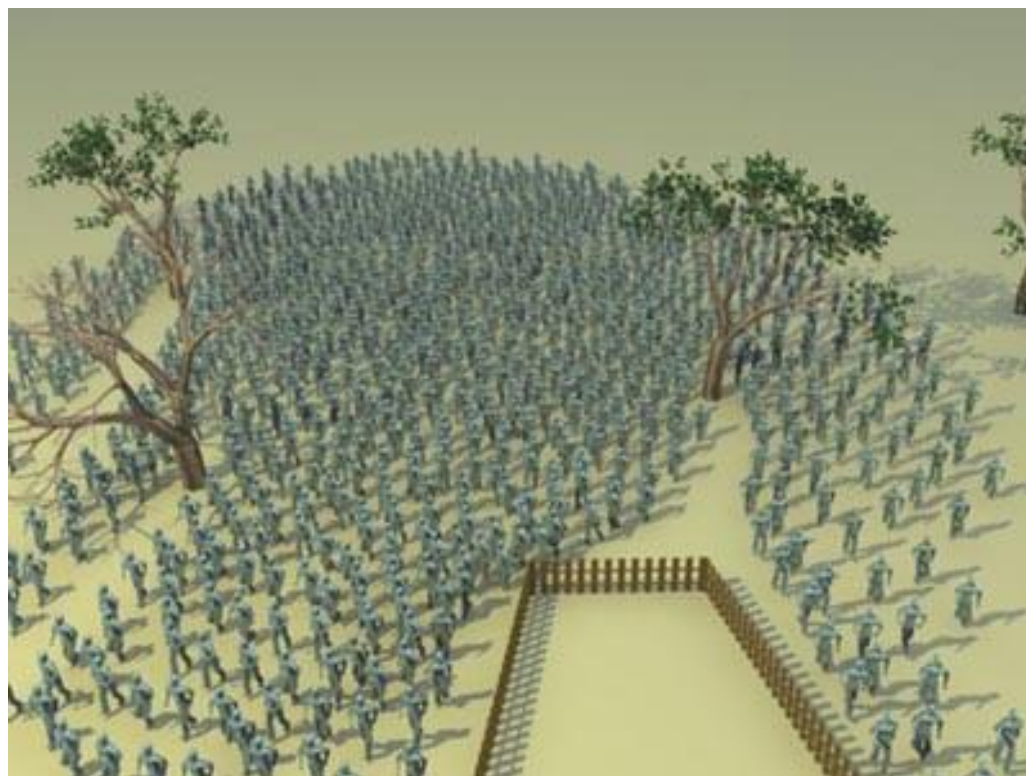
运动规划

- 在不同的姿态、运动之间切换
- 避免碰撞
- 使长串的运动看起来自然



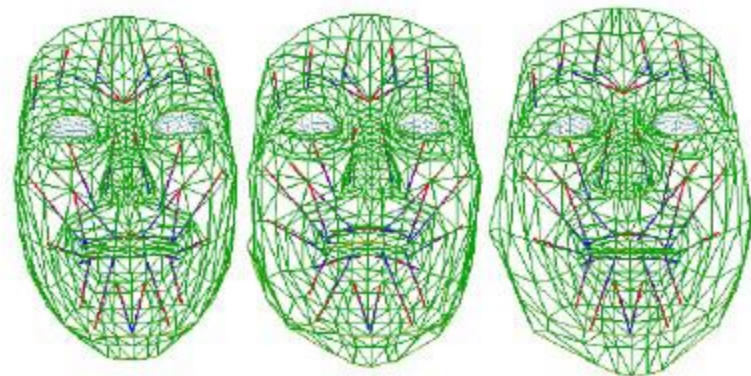
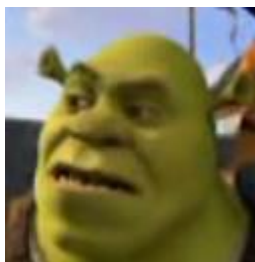
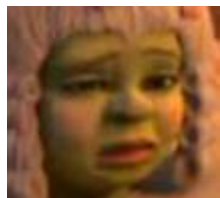
人群模拟

- 模拟大街上的人群
- 需要考虑人与人之间的相互影响



人脸动画

- 捕捉人脸动画
- 使用 骨骼-肌肉 模型



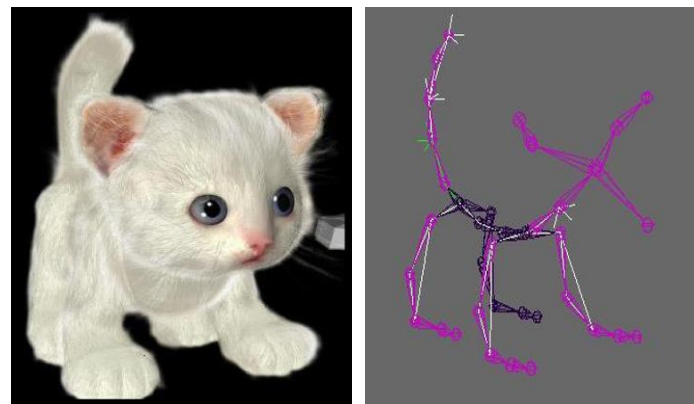
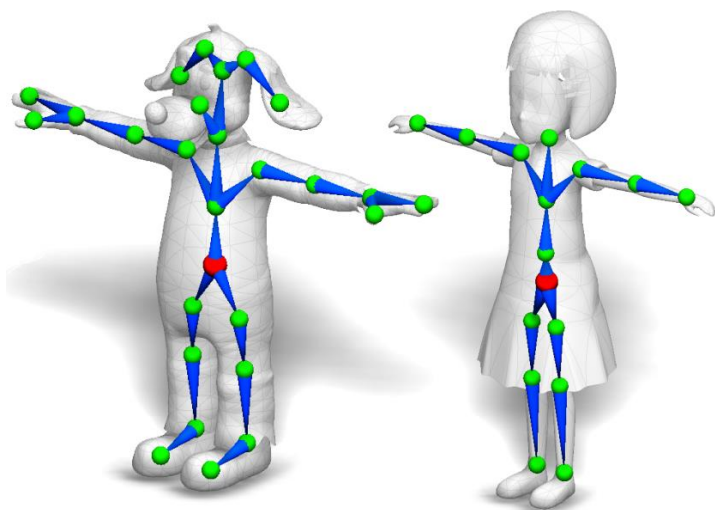
Phace: Physics-based Face Modeling and Animation

提纲

- **关节动画**
- 骨架蒙皮
- 运动捕捉
- 群体动画

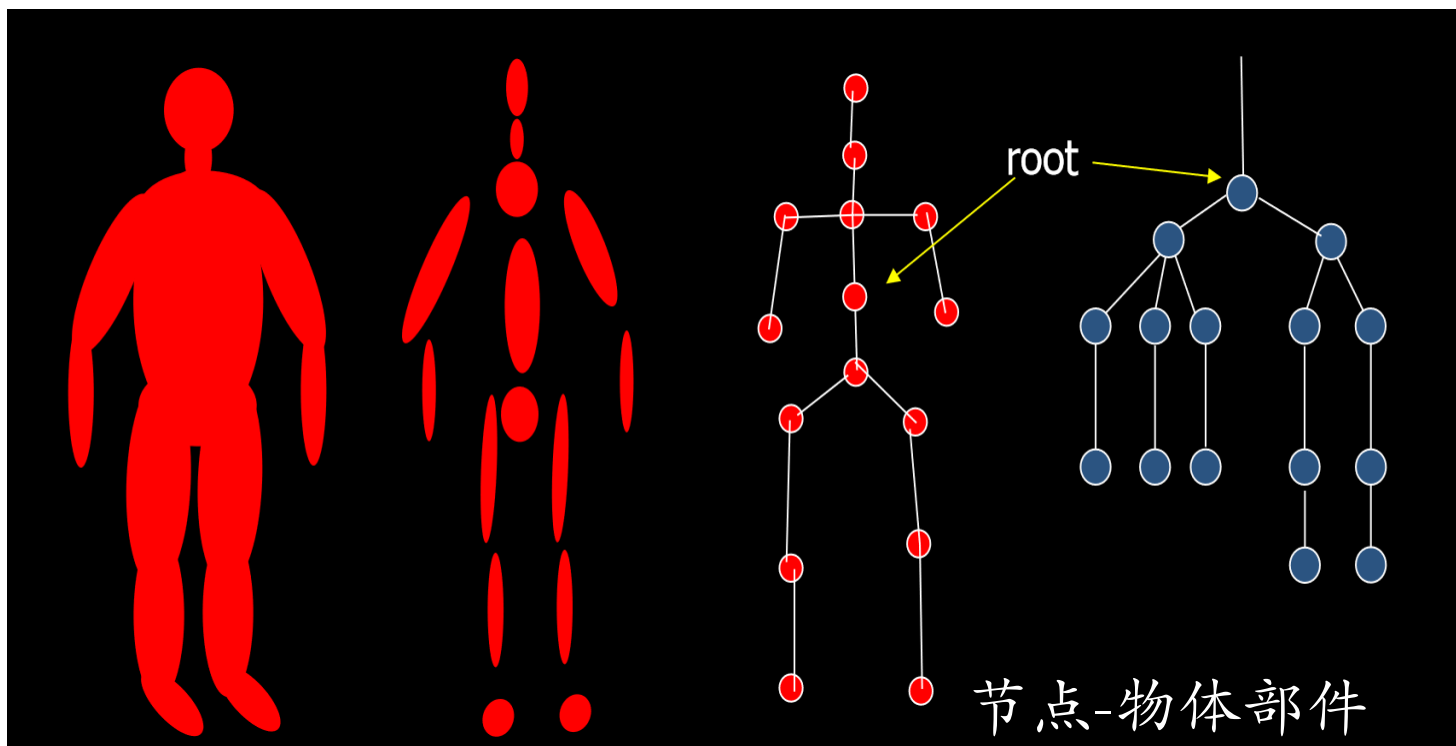
关节模型 (Articulated Characters)

- 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。



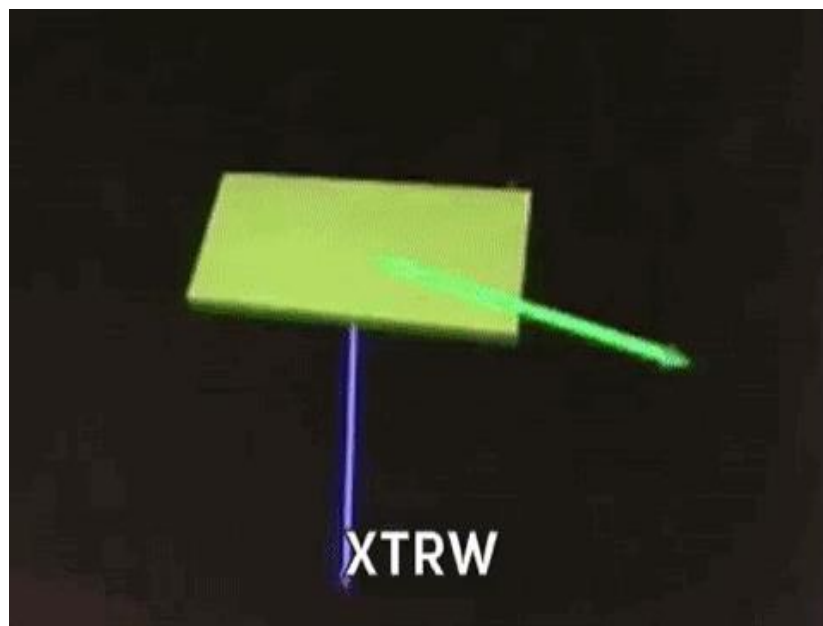
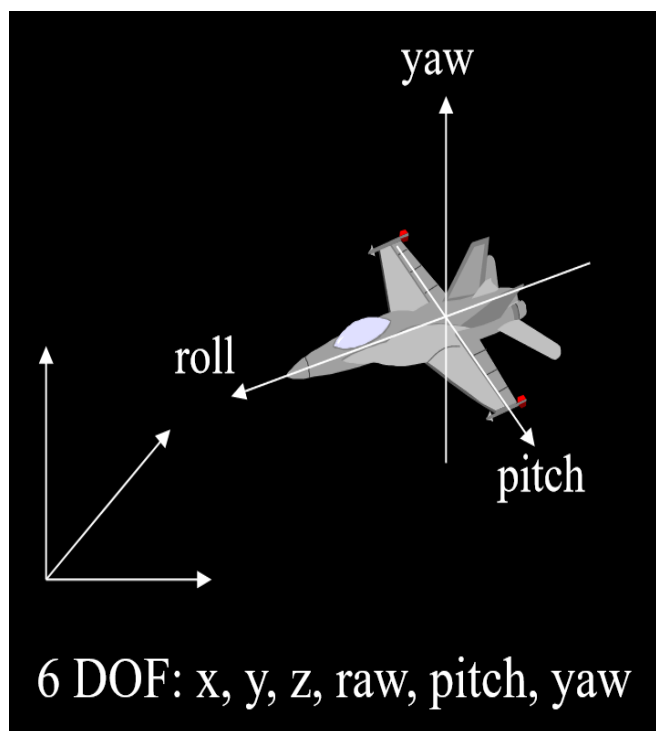
关节模型

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



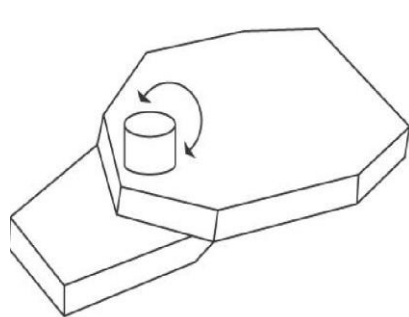
关节模型

- 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

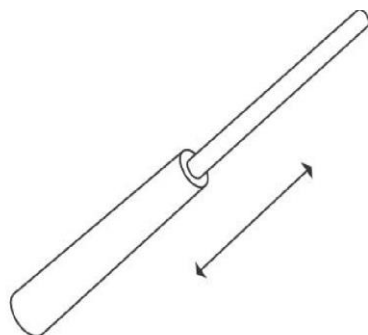


关节模型

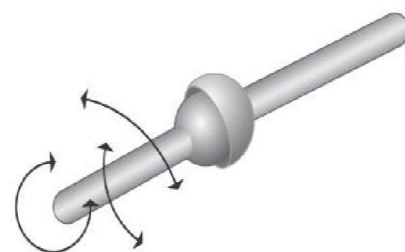
- 单自由度关节
 - 允许在一个方向运动
- 2自由度关节
- 3自由度关节
- n 自由度关节



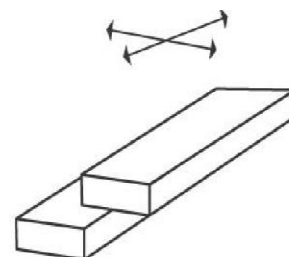
Revolute joint



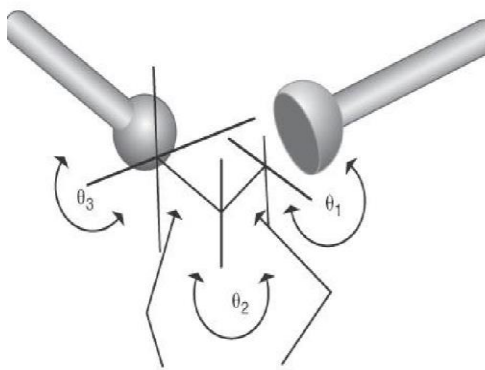
Prismatic joint



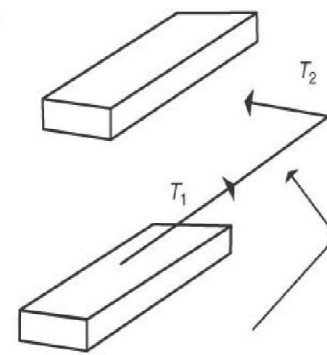
Ball-and-socket joint 球状关节



Planar joint 平面关节



zero-length linkages

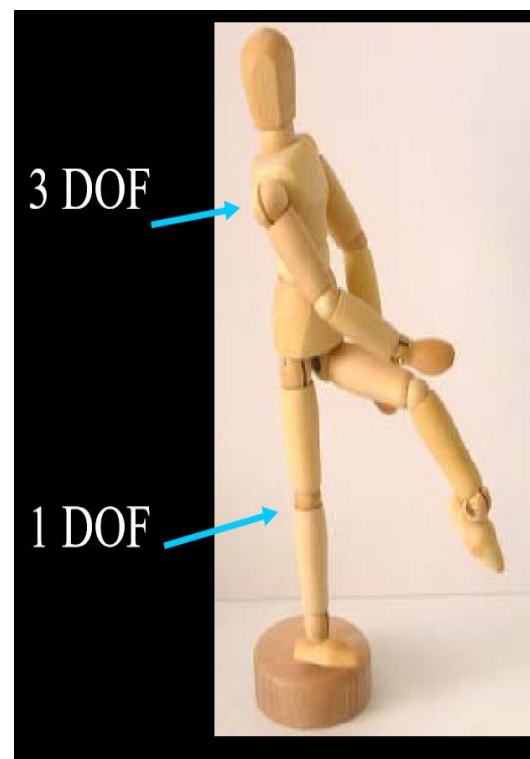


zero-length linkage

[demo](#)

关节模型

- 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



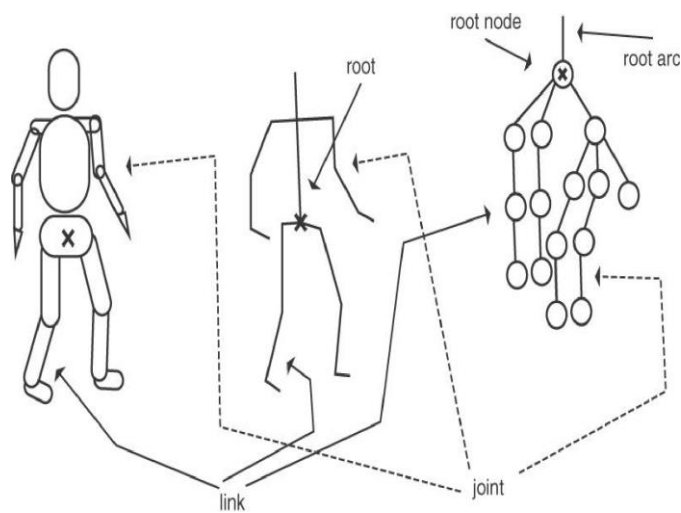
关节模型

- 树状层次模型结构

- 节点：表示物体部件

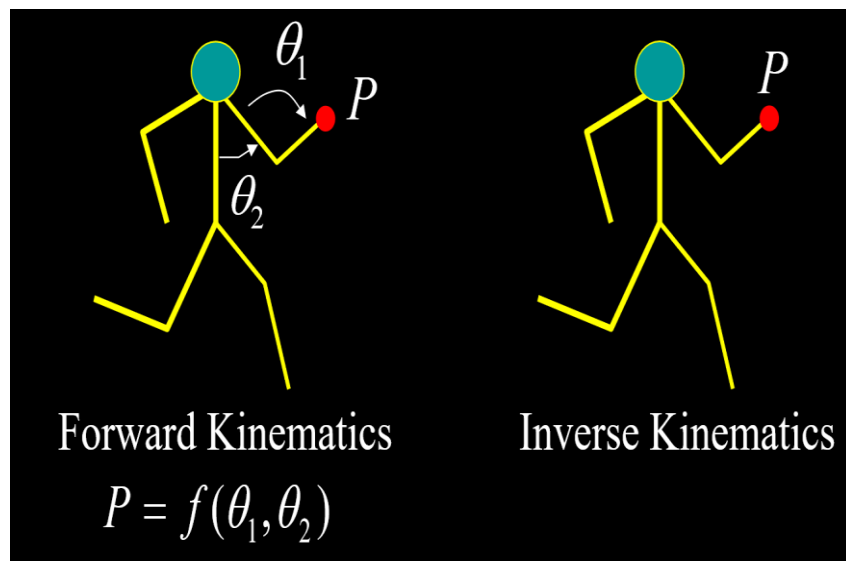
- 根节点：对应于物体的根部，其位置在世界坐标系中给出
 - 其它节点：相对于根节点来表示

- 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

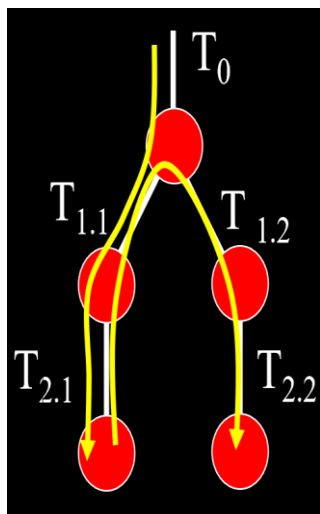
- 正向运动学 (Forward kinematics)
 - 从关节空间映射到笛卡尔空间
- 反向运动学 (Inverse kinematics)
 - 从笛卡尔空间映射到关节空间



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



$$M=I$$

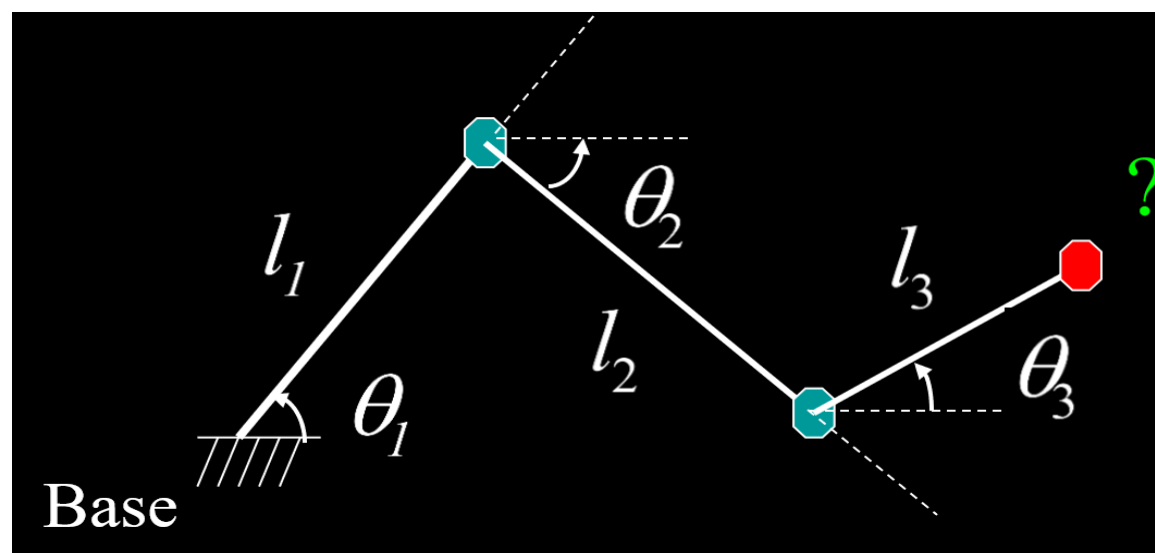
$$M=T_0$$

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

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

运动模型

- 正向运动学 (Forward kinematics)
 - 示例



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

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

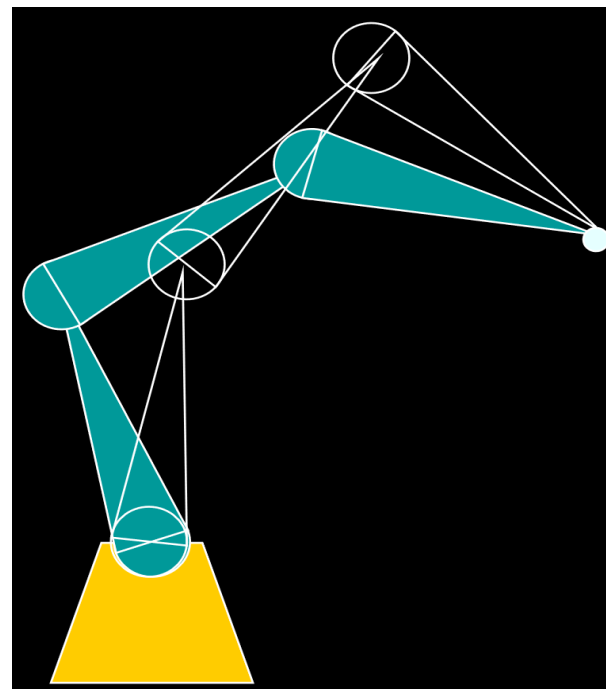
运动模型

- 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

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



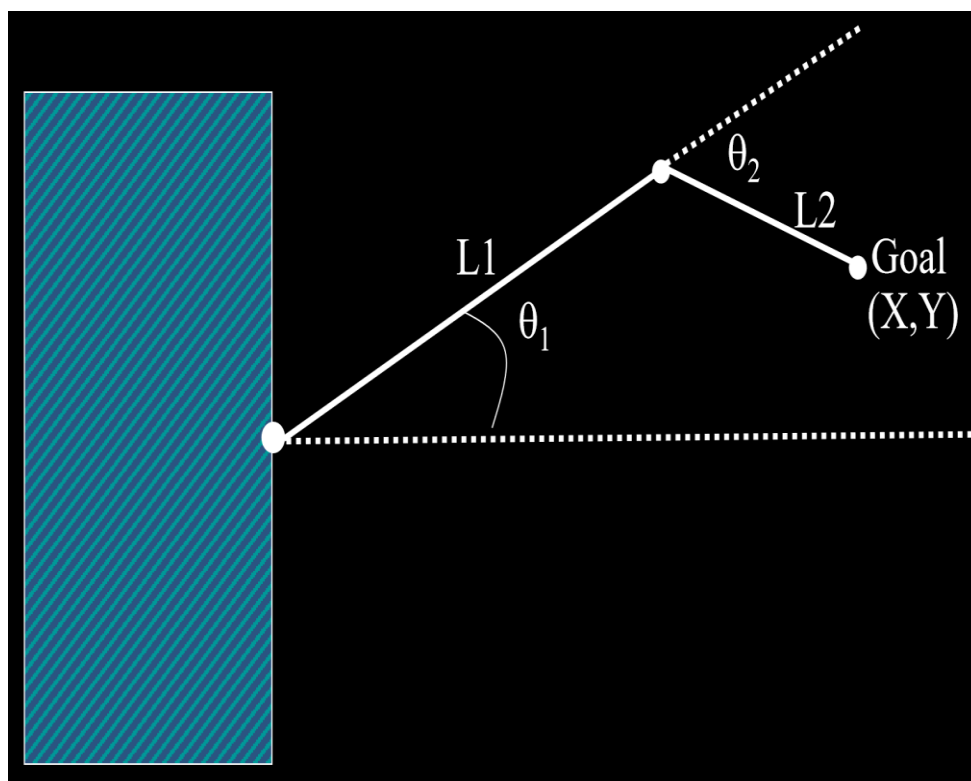
$$\{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$$



反向运动学动画

- 解析求解法

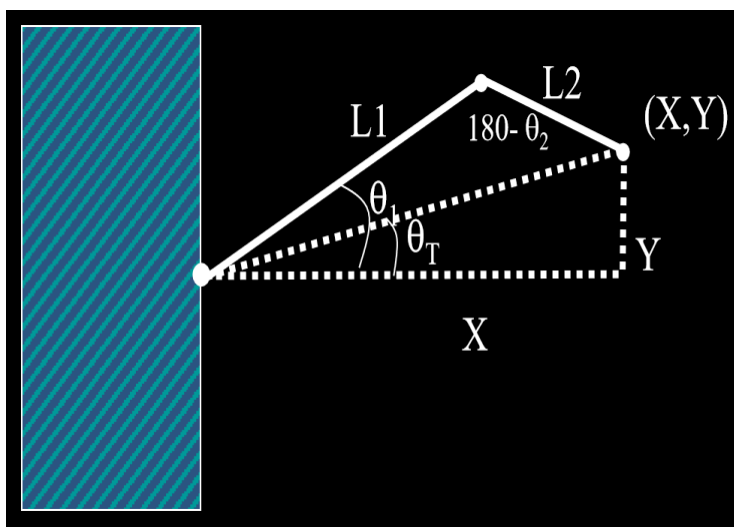
- 已知 X 和 Y 、 $L1$ 和 $L2$ ，求解 θ_1 和 θ_2



反向运动学动画

• 4.2.1 解析求解法

– 已知X和Y、L1和L2，求解 θ_1 和 θ_2



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

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

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

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

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

反向运动学动画

- 数值求解法

- 一般情况下复杂关节的IK是求解困难的

- 要求自然的运动控制

- 关节限制

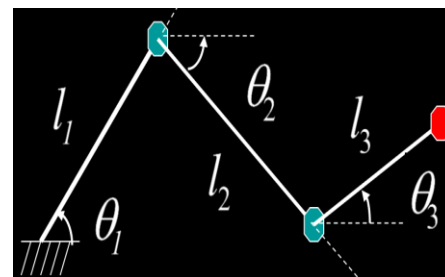
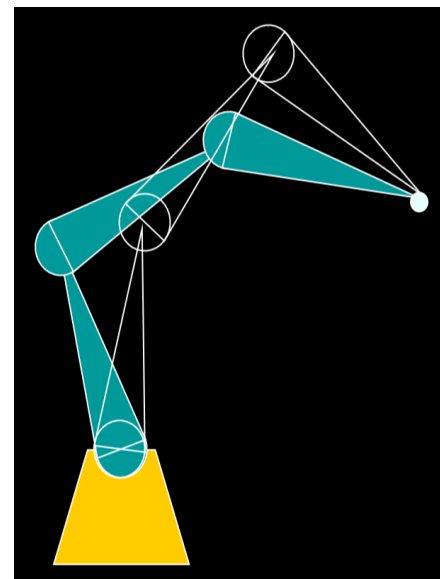
- 最小的抖动 (minimum jerk)

- 运动方式

- 奇异问题 (Singularities)

- 病态方程 (ill-conditioned)

- 奇异方程 Singular



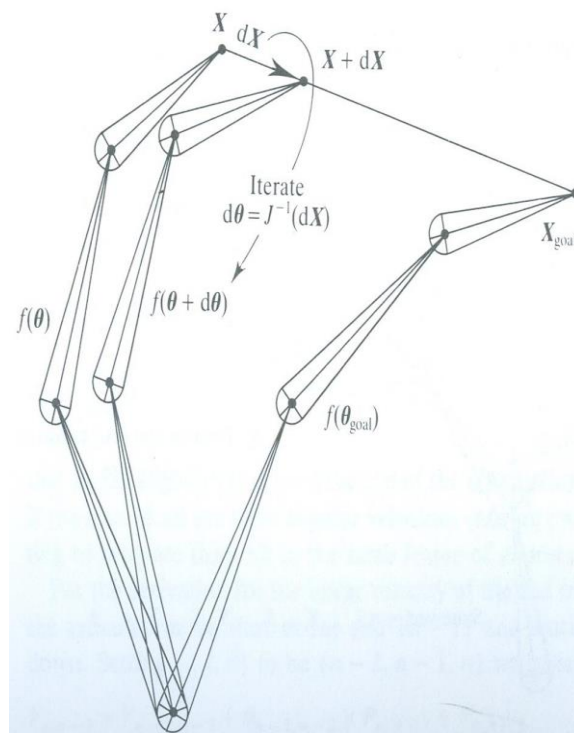
$$\theta_1, \theta_2, \theta_3 = f^{-1}(P)$$

反向运动学动画

- 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

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

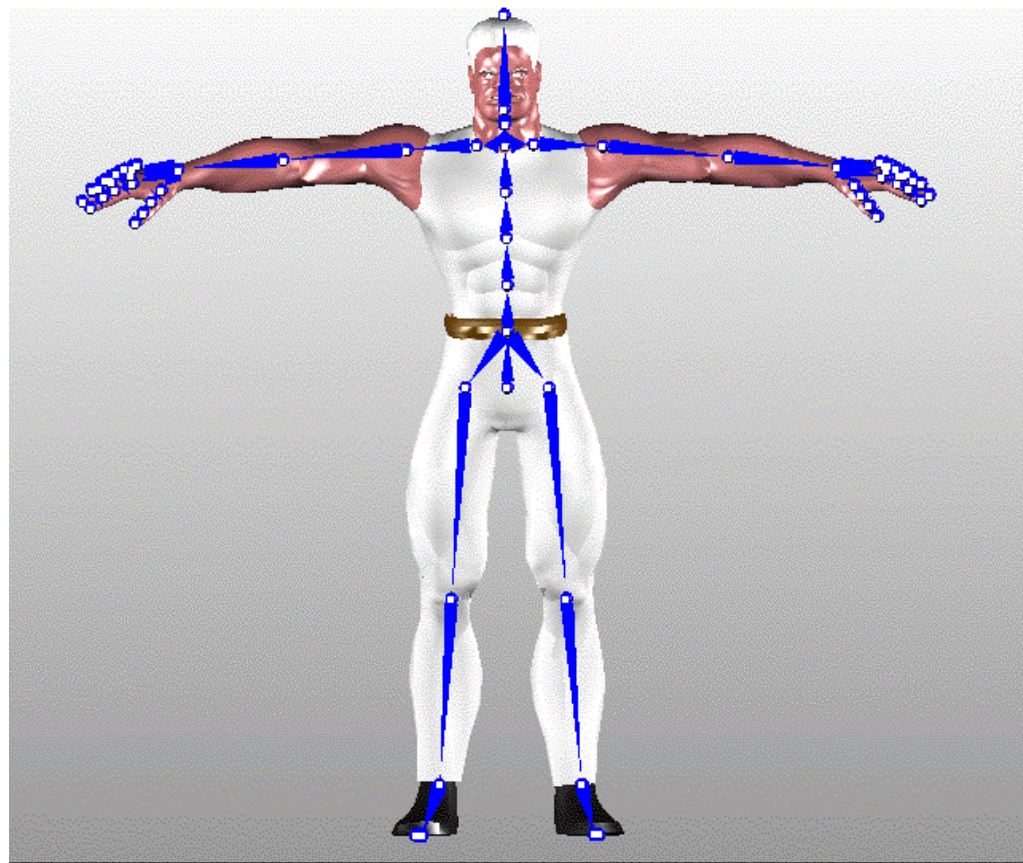


提纲

- 关节动画
- **骨架蒙皮**
- 运动捕捉
- 群体动画

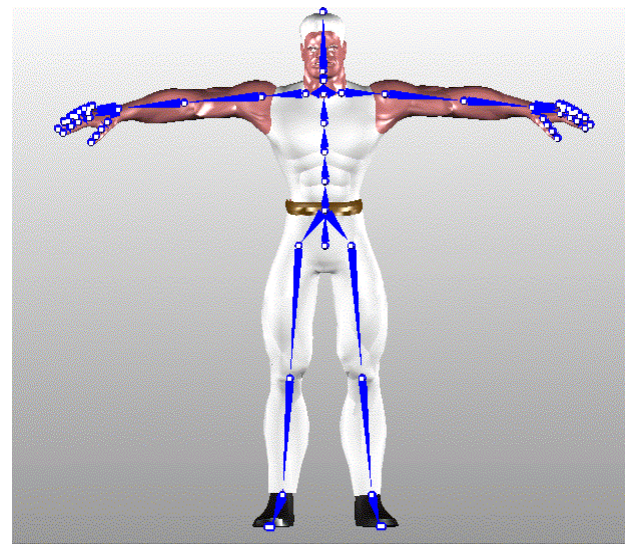
骨架-蒙皮

- 骨骼生成
- 蒙皮



蒙皮 (Rigging)

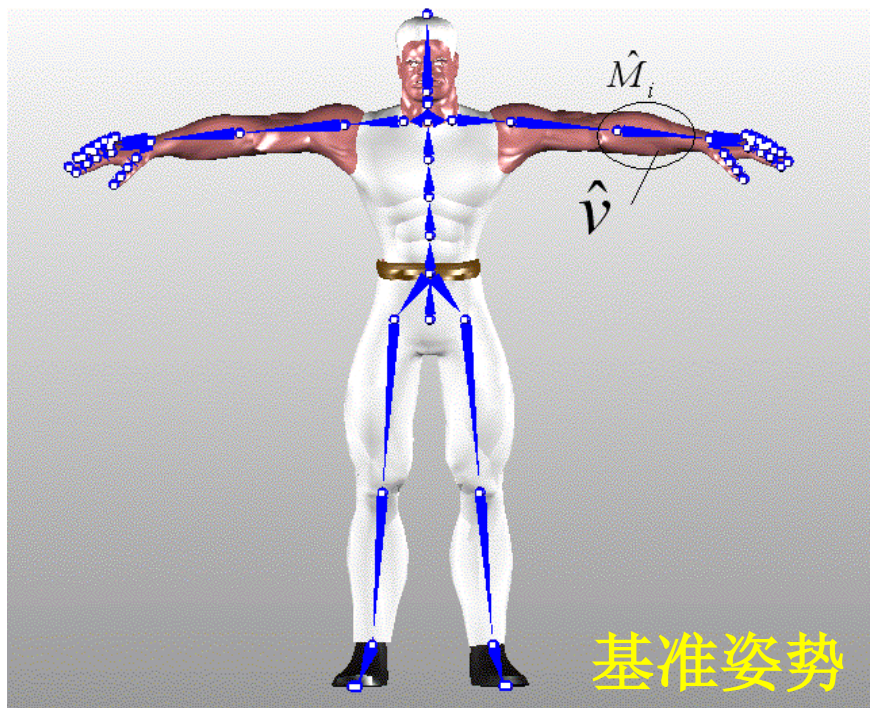
- 给定了角色的模型
- 给定了骨骼和骨骼运动
- 角色模型必须随骨骼的运动而形变，以生成合理的动画效果
- 这个过程叫做**蒙皮**



如果是刚体...

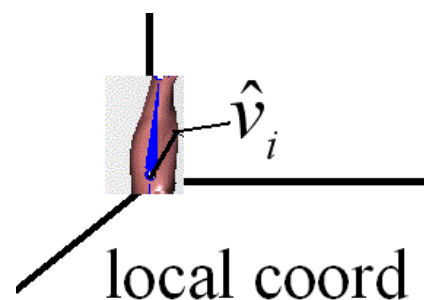


全局到局部的变换



\hat{v} 是在基准姿势中某一顶点的位置

\hat{M}_i 是在基准姿势中，骨骼*i*的变换矩阵



在局部坐标系中的位置：

$$\hat{v}_i = \hat{M}_i^{-1} \hat{v}$$

global → local global

局部到全局的变换

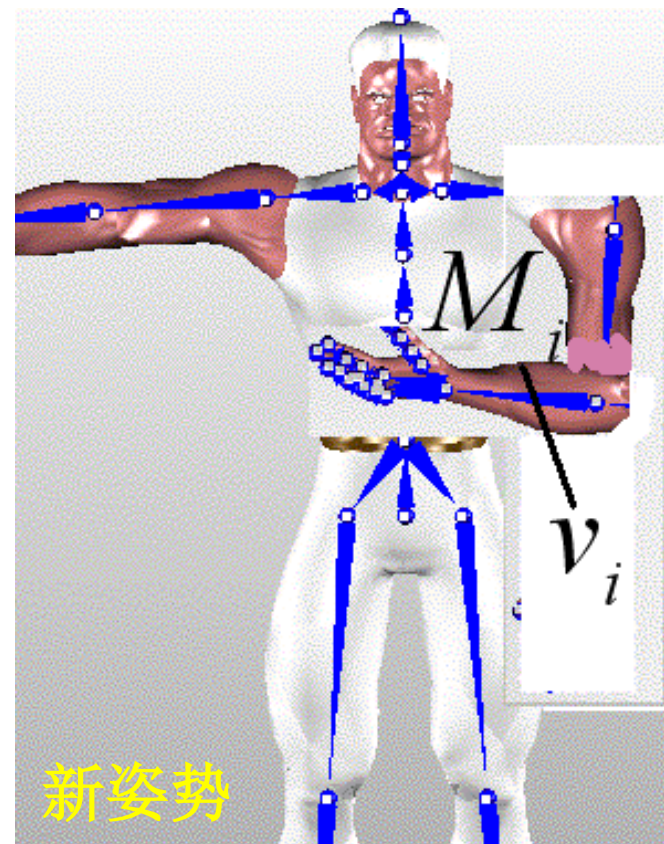
- 需要计算在新的姿势中顶点的全局位置

M_i 是新的姿势中局部到全局的变换矩阵

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{M}_i \widehat{\mathbf{M}}_i^{-1} \widehat{\mathbf{v}}$$

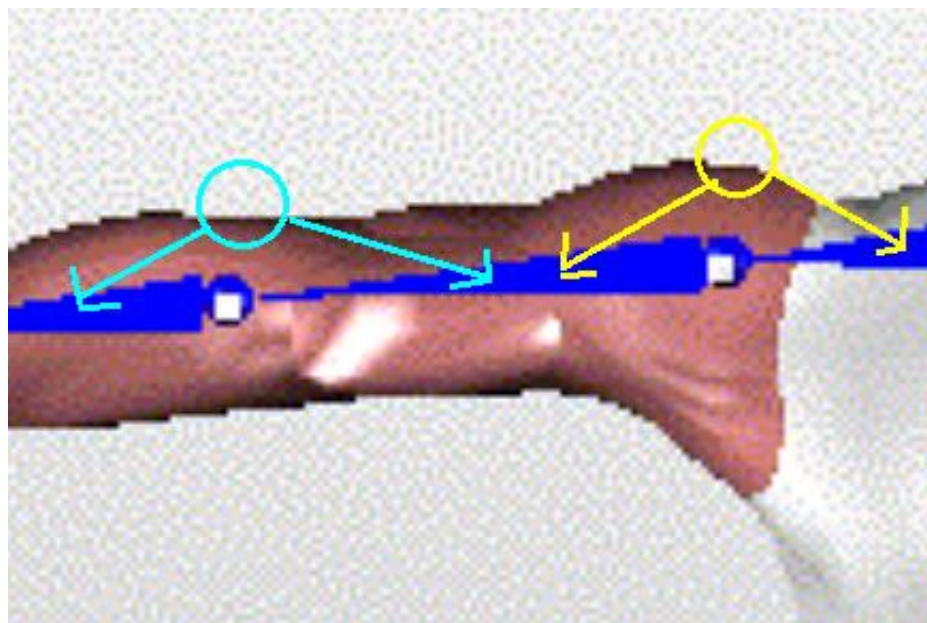
Local → global

local



对于动画角色

- 问题：
 - 角色表面的某些点受不同部分骨骼的影响
 - 例如：关节处



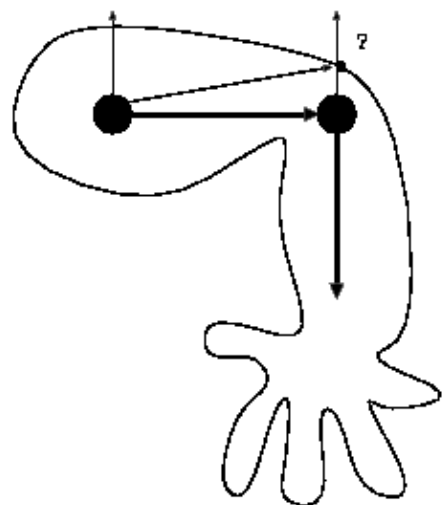
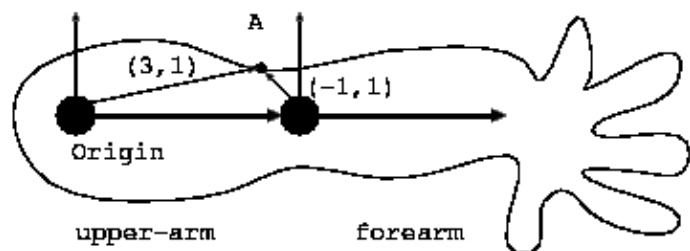
解决方案：线性混合 (Linear Blending)

- 将某一顶点根据不同骨骼的运动计算出的形变进行线性叠加
- 使用权重 w_i

$$\mathbf{v}_i = \sum_{i=1}^b w_i \mathbf{M}_i \hat{\mathbf{M}}_i^{-1} \hat{\mathbf{v}} \quad \sum_{i=1}^b w_i = 1$$

b 是影响 v 的骨骼个数

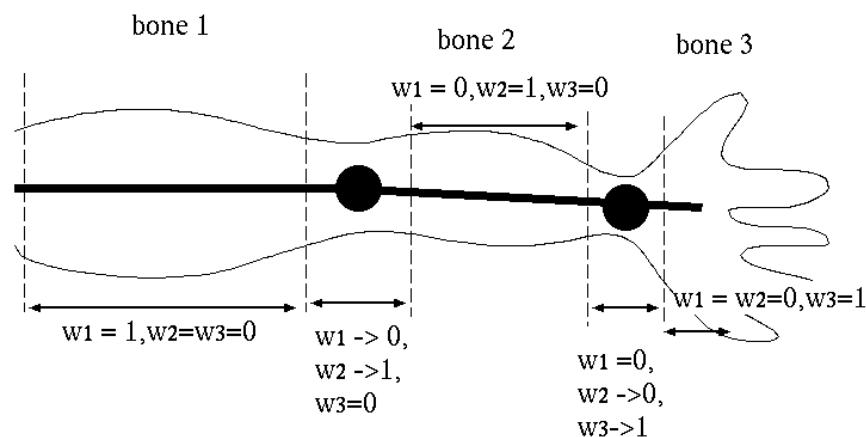
例子



- 在手肘弯曲90度后，A点的位置在哪里？
 - 如果A点属于上臂
 - 如果A点属于下臂
 - 如果A点以0.8的权值属于上臂，以0.2的权值属于下臂

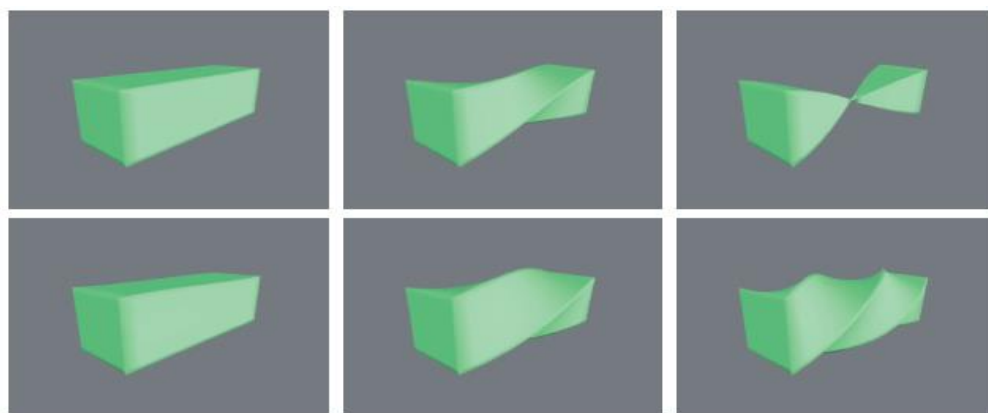
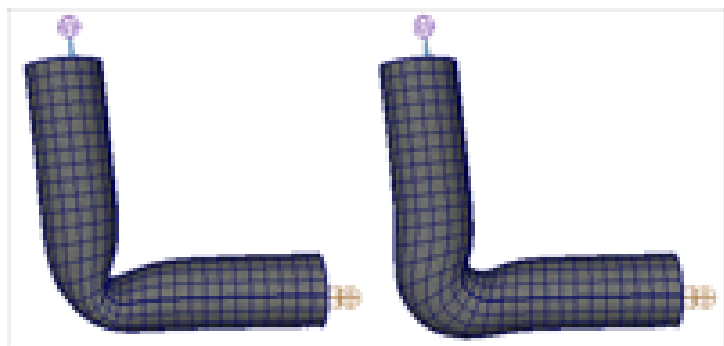
如何确定权值？

- 决定mesh顶点与骨骼的对应关系
 - 如果顶点 v 在骨骼 i 的正中心，那么 $w_i = 1$ ，对于其他的骨骼 $w_{j \neq i} = 0$
 - 如果顶点 v 在骨骼 i 和 $i+1$ 之间， w_i 逐渐减少为0， w_{i+1} 逐渐增加为1
 - 如果顶点 v 被三个或更多的骨骼所控制，那么权重由顶点到骨骼的距离而定



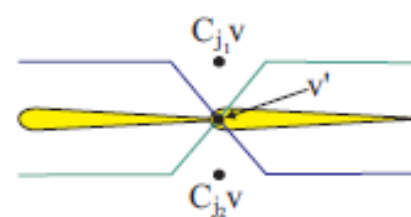
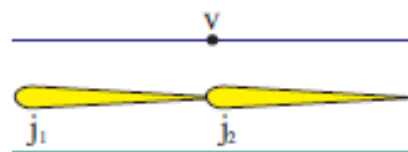
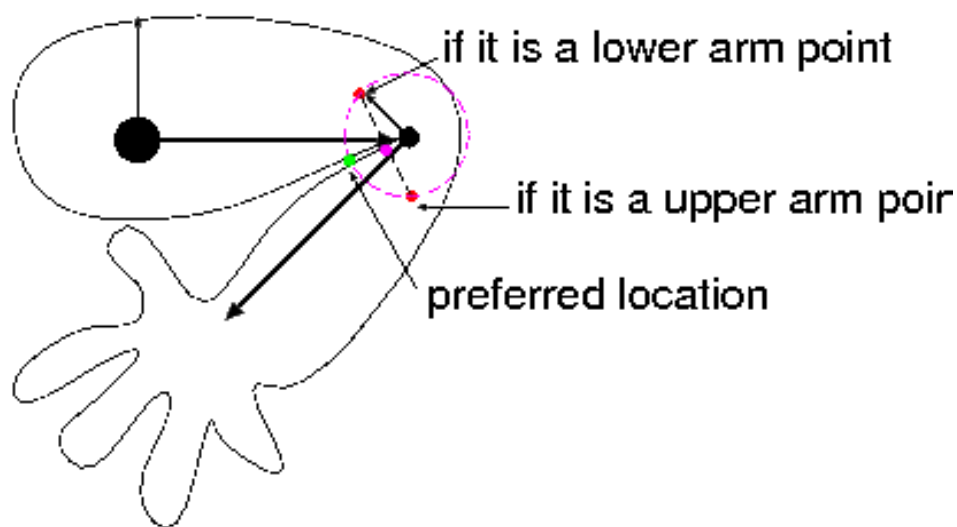
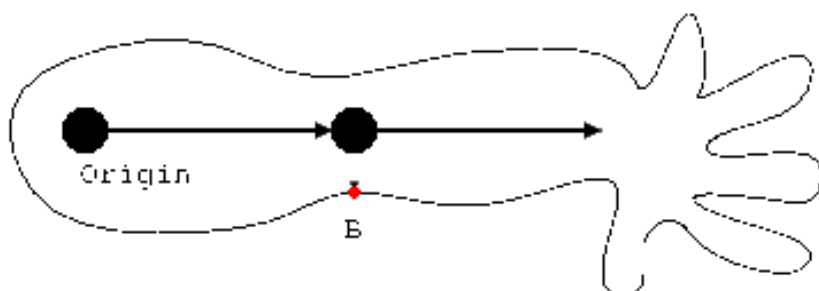
线性混合有什么问题？

- 关节处扭转角度过大的时候，mesh损失了体积
- 这个现象被叫做“joint collapse” 和 “candy wrapper”
- 这种现象出现的原因是方法缺乏灵活度.



为什么会出现“joint collapse”

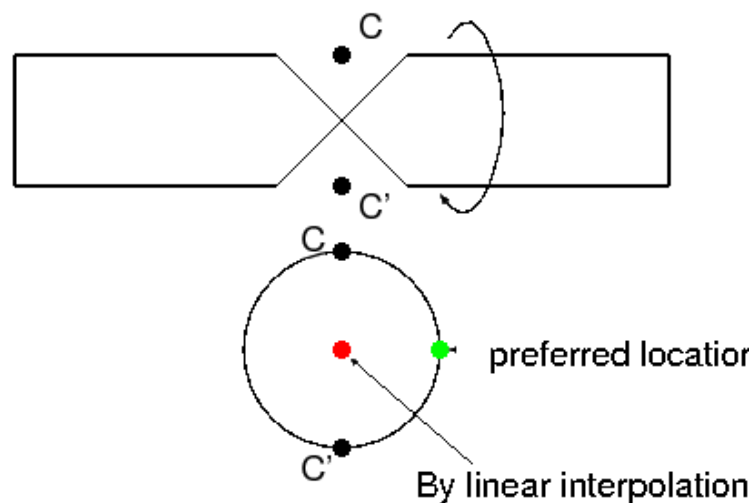
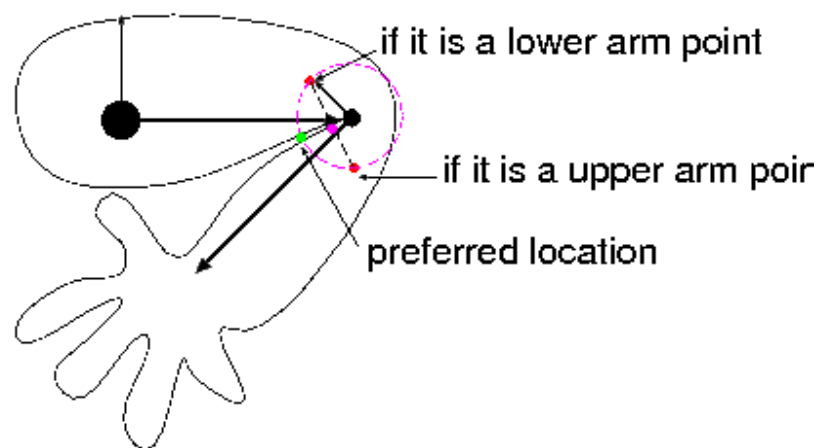
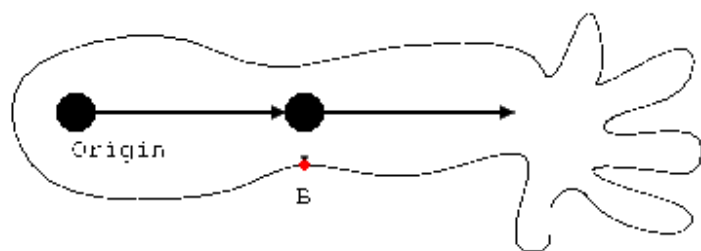
- 笛卡尔坐标系下的简单线性混合会造成不自然的效果



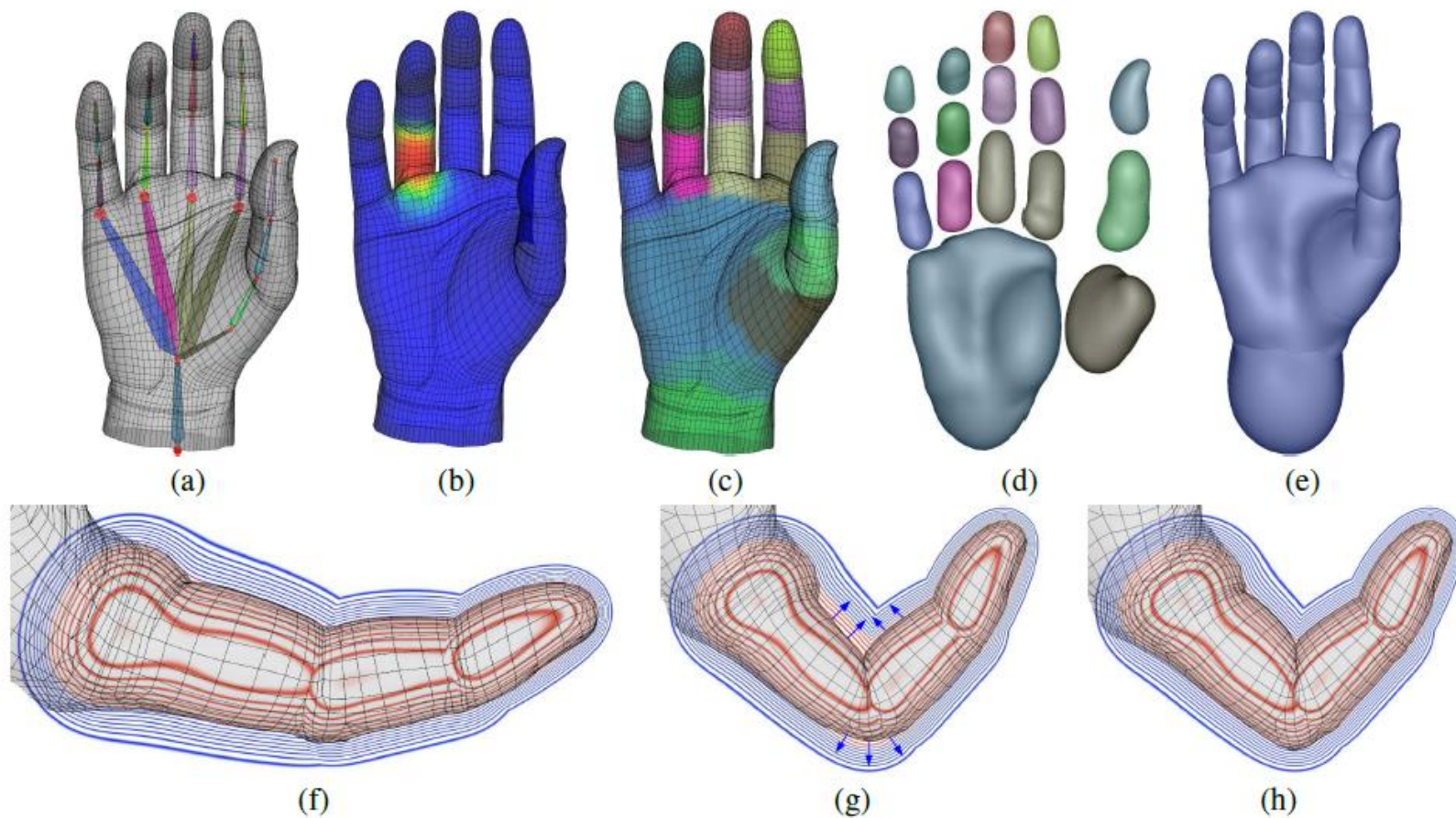
如何解决?

- 对齐次变换进行插值

Kavan et al. [SIGGRAPH08], etc.



拓展：Implicit rigging [sig13]



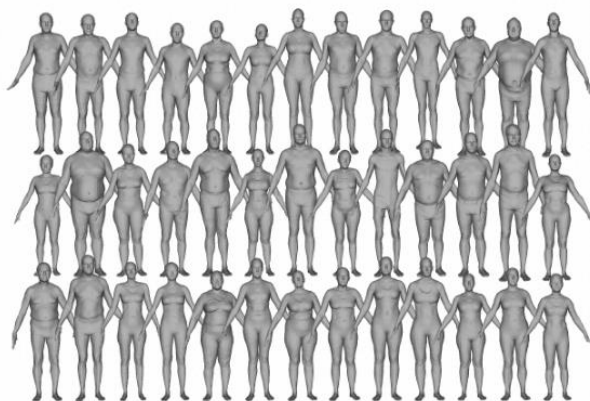
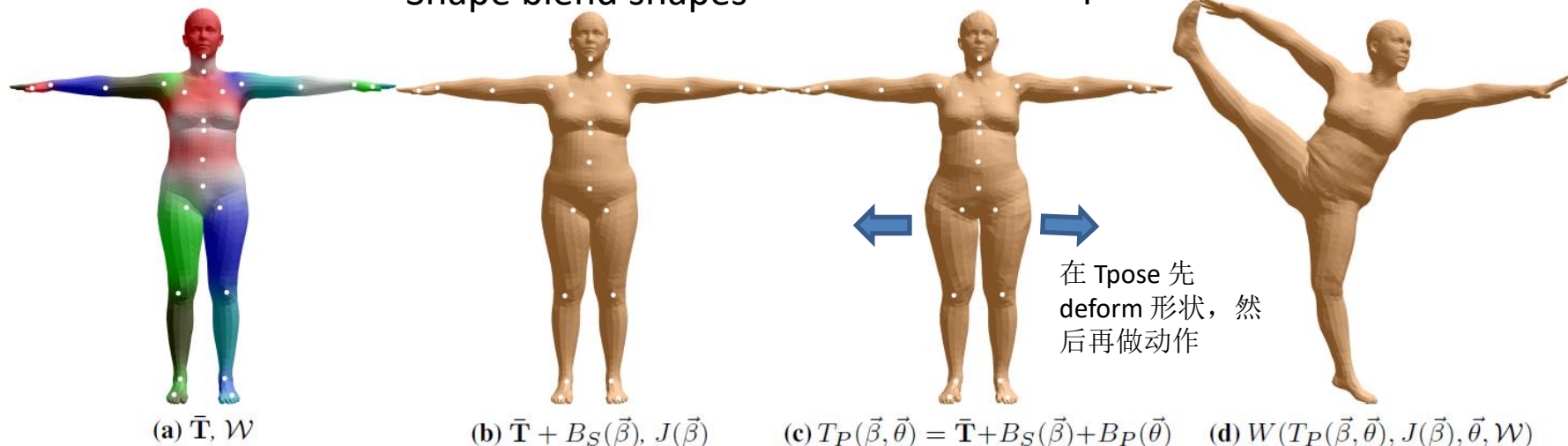
对每一个关节进行implicit function的建模，在产生了体积损失之后，沿着function的梯度方向“复原”体积

拓展：SMPL模型方法[sig15]

给定姿态、形体、表观信息与其他三维参数，帮助进行人体重建。

Shape blend shapes

Pose blend shapes



Shape blend shapes: model the body shape based on a dataset of human body

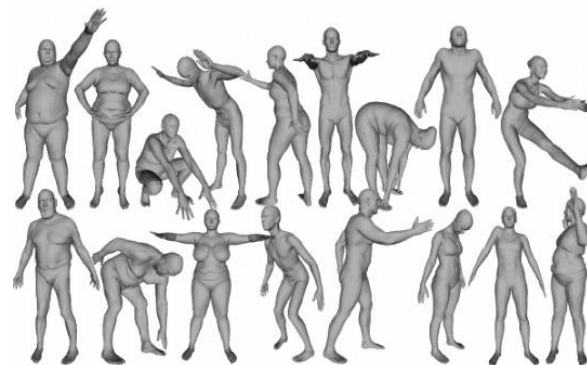
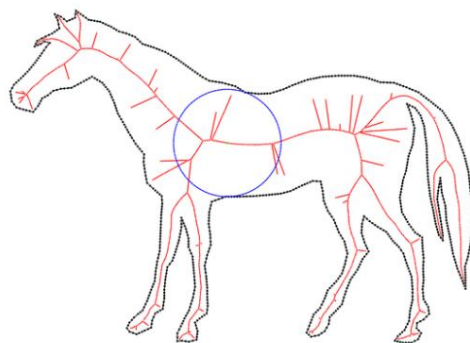
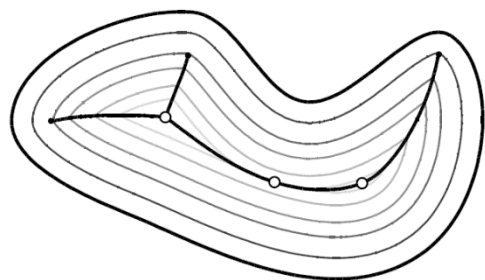


Figure 4: Sample registrations from the multipose dataset.

Pose blend shapes: model how the shape transform during the human motion

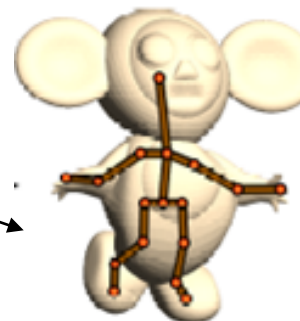
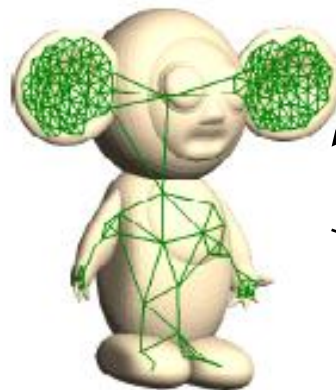
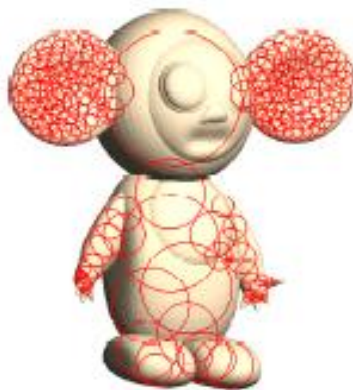
自动装配骨骼

- 如何从一个多边形形状自动计算骨骼？
- 可以用中轴 medial axis
- Medial axis 到多边形的距是C1连续的
- 有很多经典的计算方法，例如circle / sphere fitting



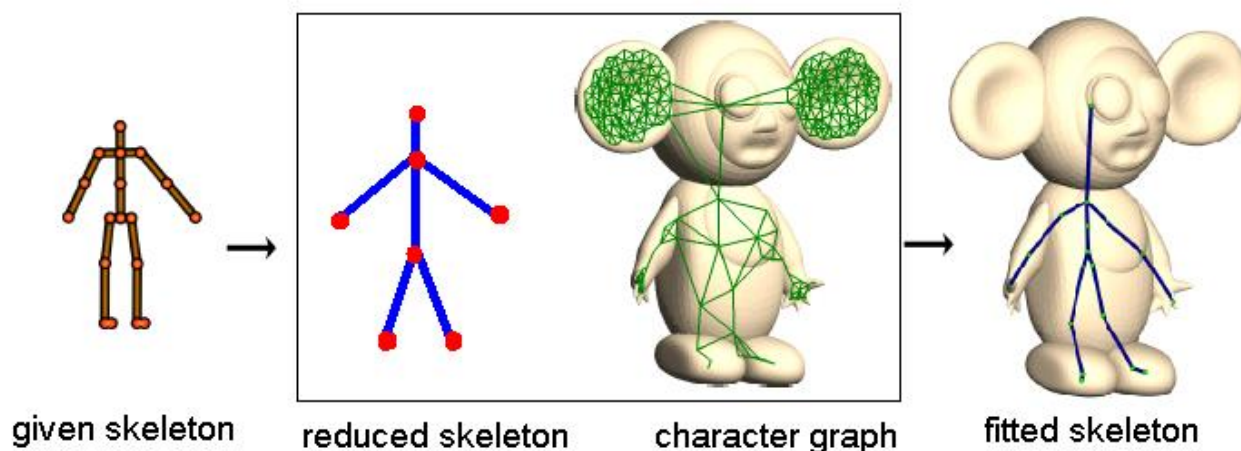
自动装配骨骼

- 将中轴上的点按照到表面的距离排序
- 进行球体匹配 - 距离大的先匹配
- 如果中轴点已经被其他球体包含，则跳过
- 构建一个Graph，顶点是球的重点，如果两个球体交叉，则对应中点间建立一个边
- 将已有个骨骼与Graph进行匹配



离散骨骼的嵌入

- 从已有的骨骼建立一个简化版的骨架
- 将简化版的骨架与graph相匹配
- 建立一个惩罚函数，最小化这个惩罚函数以得到最优匹配

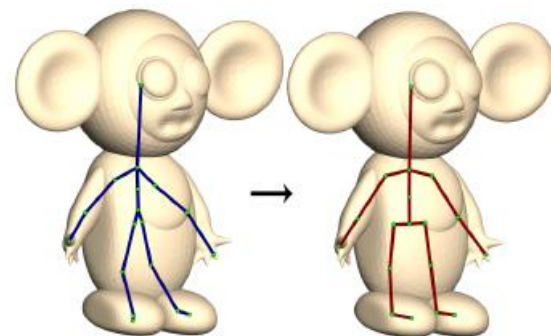


惩罚函数包含的惩罚项

- 过短的骨骼
- 关节间不合理的角度
- 对称骨骼的长度差
- 骨骼间过多的共享关节点
- 脚关节漂浮
- 长度为0的骨骼
- 不合适的骨骼方向
- 给定骨骼里长距离关节在graph中距离过短

嵌入的优化

- 通常来讲，上述方法可以得到合理的结果
 - 但有些关节可能出现异常
- 以下情况的关节位置可以进一步地优化：
 - 不对称的关节
 - 过短的骨骼
 - 方向不一致
 - 骨骼越出网格表面



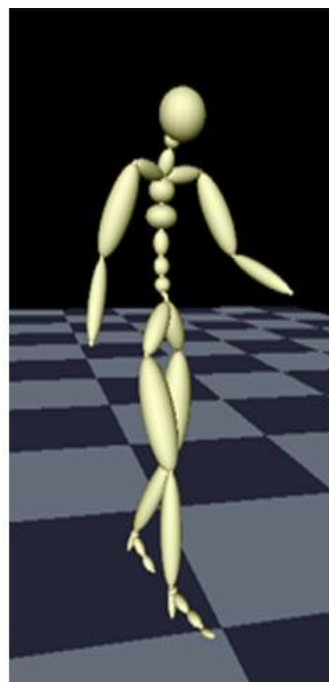
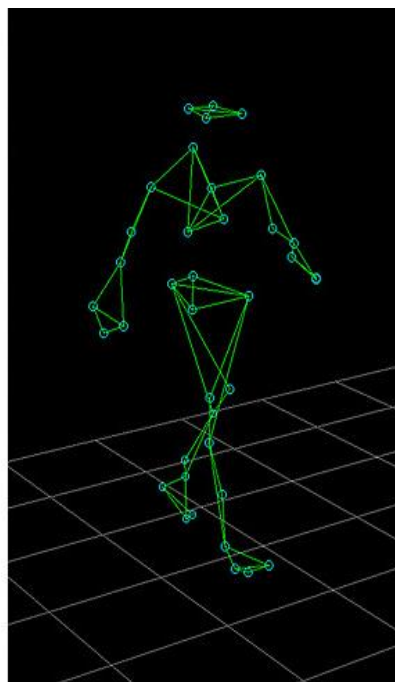
[demo](#)

提纲

- 关节动画
- 骨架蒙皮
- **运动捕捉**
- 群体动画

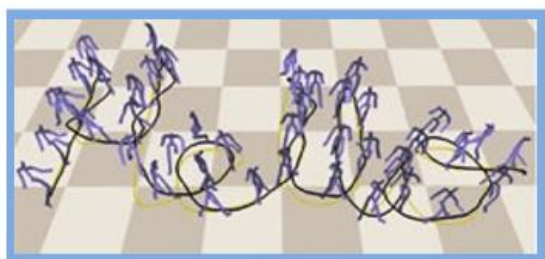
运动捕捉 (motion capture)

- 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)

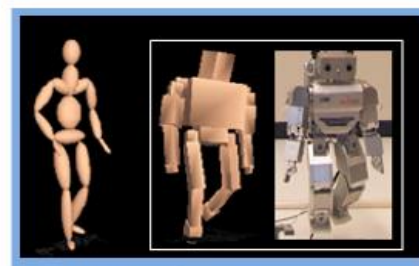
— 广泛应用于军事、娱乐、体育、医疗、视觉等



Computer animation



Biomechanics



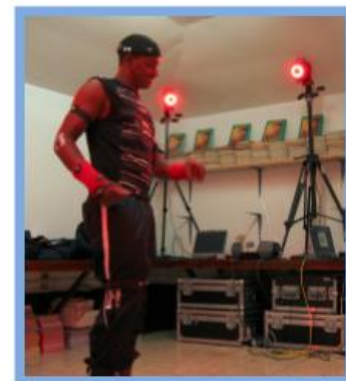
Robotics



Cinema



Video games



Anthropology

运动捕捉系统

- **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
- 缺点
 - 根据个体进行调整
 - 捕捉精度较低
 - 只适用于手的动作





-

被动式运动捕捉

- 光学图像式 ([Demo](#) video2)
 - 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



提纲

- 关节动画
- 骨架蒙皮
- 运动捕捉
- **群体动画**

群体

- 在生物界，许多动物如鸟、鱼等以某种群体的方式运动。这种运动既有随机性，又有一定的规律性
- 群体动画
 - Reynolds提出的群体动画包含两个对立的因素，即 既要相互靠近又要避免碰撞。用三条按优先级递减的原则来控制群体的行为：
 - 碰撞避免原则，即避免与相邻的群体成员相碰；
 - 速度匹配原则，即尽量匹配相邻群体成员的速度；
 - 群体合群原则，即群体成员尽量靠近。

群组

- 群组

- 在同一物理环境下拥有相同目的的一群个体，他们的行为有别于作为单独个体时的行为

- 层次

- 群：crowd behaviors
 - 组：group behaviors
 - 个体：individual behavior

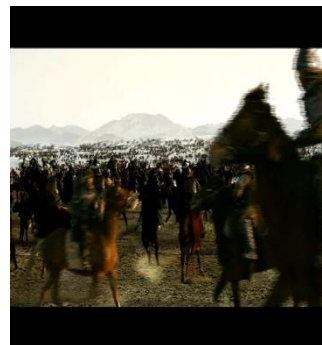


动画效果

- 得到大场面的视觉震撼效果
- 动漫设计和影视特技中，不可避免地会遇到大规模群体动作场面的制作问题
 - 两军对垒中的数十万大军冲锋的效果、兽群、鸟群等，请群众演员成本高、指挥调度难、拍摄困难等。
- 减少动画师的工作量，节约成本



花木兰



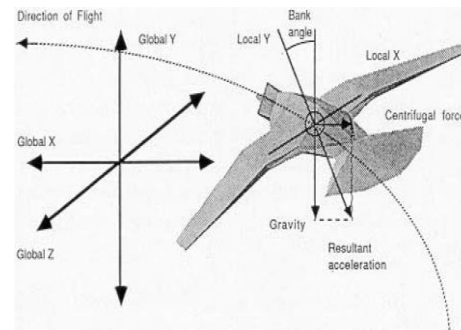
贞观之治

Flock-and-Boid模型

- 传统例子系统
 - 基本形状简单：点、球、椭球、立方体、圆…
 - 行为简单：物理运动
- Flock-and-Boid模型
 - Flock：具有整体对齐、非碰撞、聚集运动的一组物体
 - Boid：模拟类似于鸟、鱼等的物体



Flock

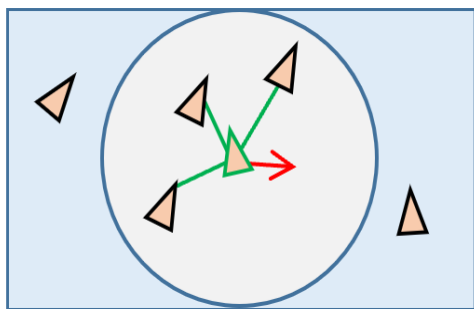


Boid

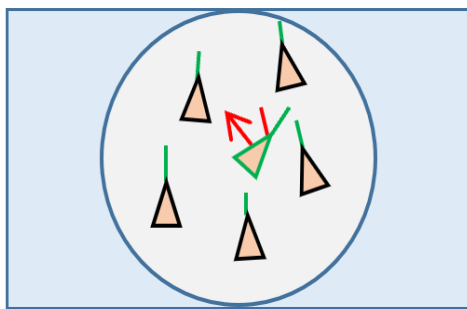
Flock-and-Boid模型

- Boid

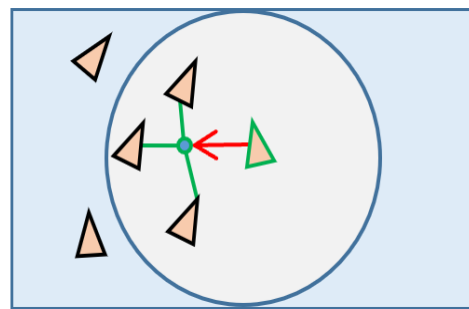
- 每一个Boid个体应该具有鸟的大致形状
- 个体在飞行时沿着一条路径进行动态、增量和刚性运动



(a) 避免碰撞



(b) 速度匹配



(c) 合群: 朝向群体中心

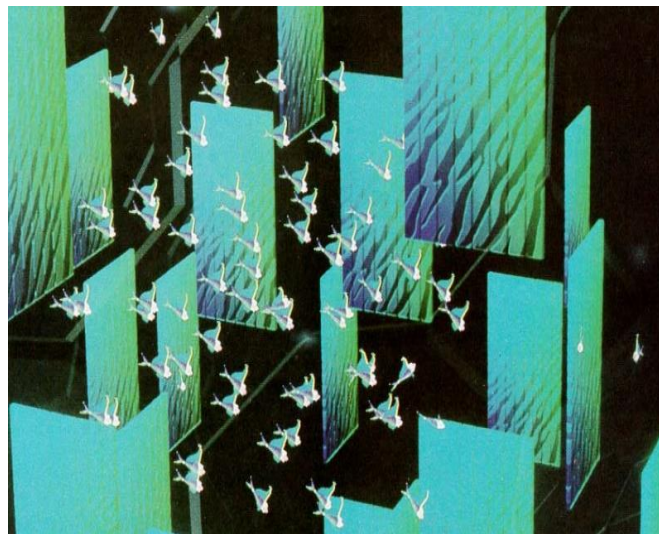
Flock-and-Boid模型

- Flock

- 合群原则

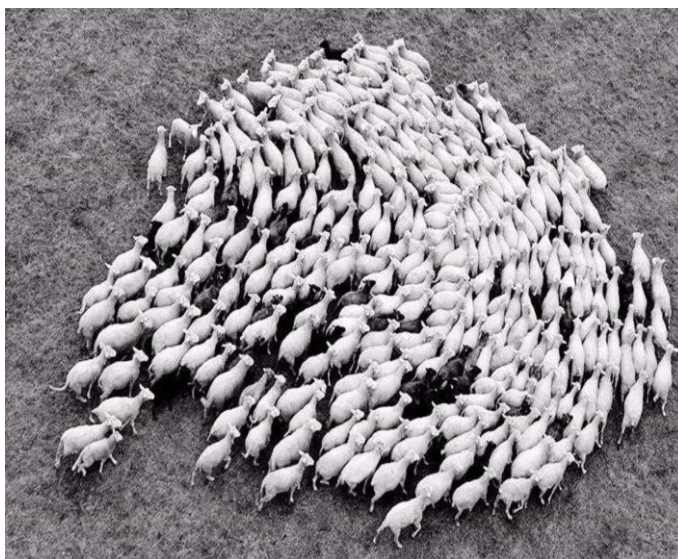
- Boid局部感知的群体中心是相邻个体子集的中心
 - 越靠近群体边缘的Boid个体，受局部感知的影响越大
 - 群体允许分裂和合并

[demo](#)



社会力模型

- 人群聚集的群体行为
 - 环境的物理约束
 - 社会心理学影响
 - 恐慌状态下的“羊群效应”



社会力模型

– 基于牛顿力学来描述受社会心理学影响的个体之间的相互作用

- 主观心理 F_i
- 其他个体 G_i
- 环境 H_i

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = F_i + G_i + H_i = m_i \frac{v_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw}$$

社会力模型

– 主观心理 F_i （自身驱动力）

$$F_i = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i}$$

$\mathbf{v}_i(t)$ 行人 i 的实际速度

τ_i 时间间隔

m_i 行人质量

$v_i^0(t)$ 期望运动速度

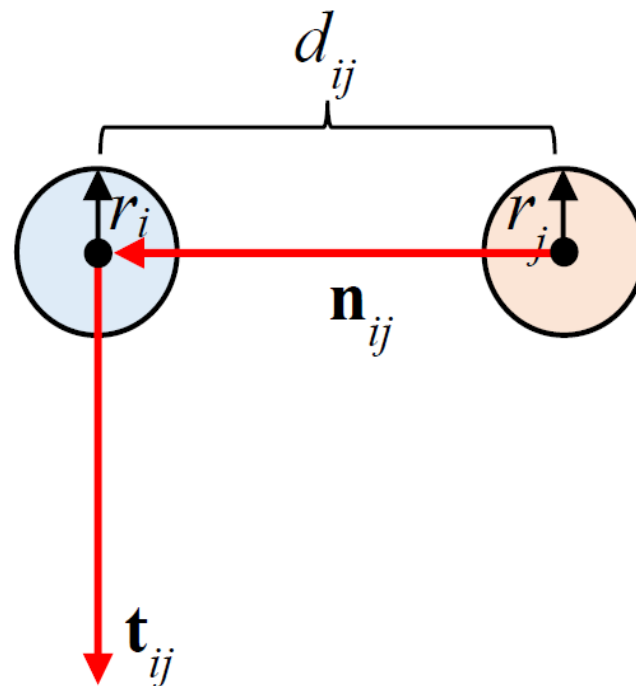
$\mathbf{e}_i^0(t)$ 期望运动方向

社会力模型

– 其他个体 G_i

$$G_i = \sum_{j \neq i} f_{ij}$$

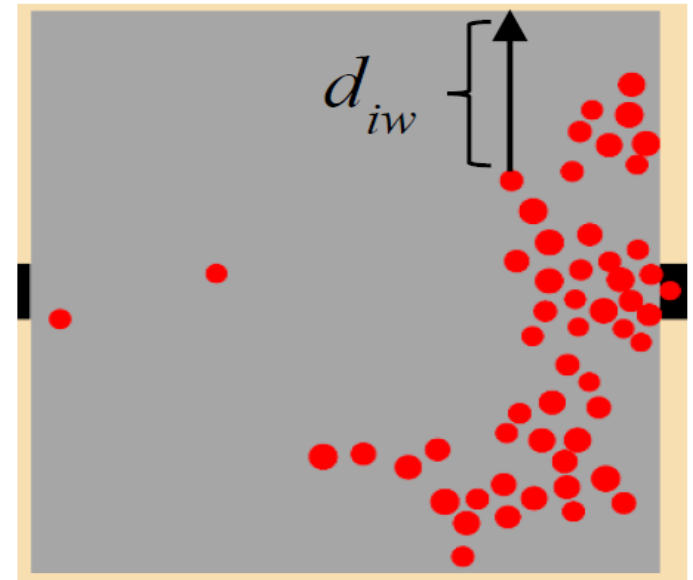
$$= \sum_{j \neq i} \left\{ A_i \exp \left[(r_{ij} - d_{ij}) / B_i \right] \right. \\ \left. + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right. \\ \left. + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij} \right\} \mathbf{n}_{ij}$$



社会力模型

– 环境 H_i

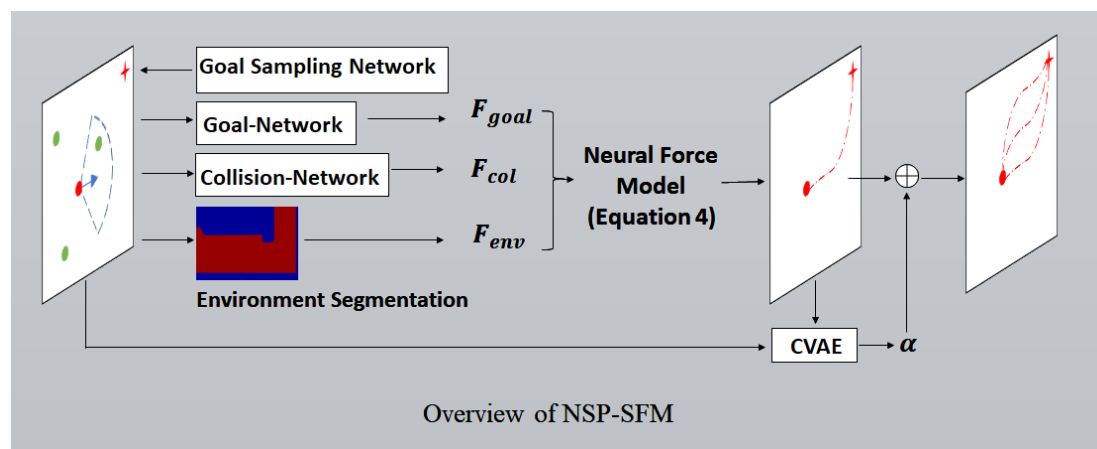
$$\begin{aligned}
 H_i &= \sum_w f_{iw} \\
 &= \sum_w \left\{ \begin{aligned} &A_i \exp[(r_i - d_{iw}) / B_i] \\ &+ kg(r_i - d_{iw}) \\ &- \kappa g(r_i - d_{iw})(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iw})\mathbf{t}_{iw} \end{aligned} \right\} \mathbf{n}_{iw}
 \end{aligned}$$



[Demo](#)
video3

拓展：基于神经网络的社会力模型

- Human trajectory prediction via Neural Social Physics (ECCV2002)



Interpretability of Prediction



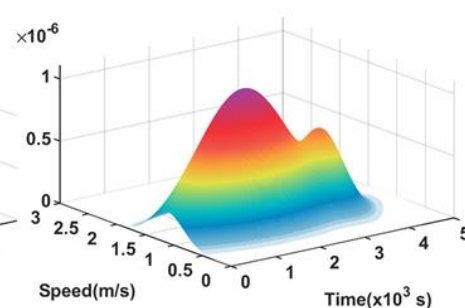
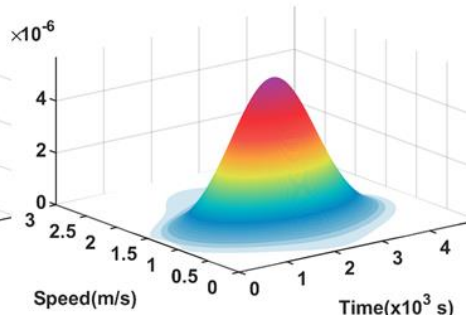
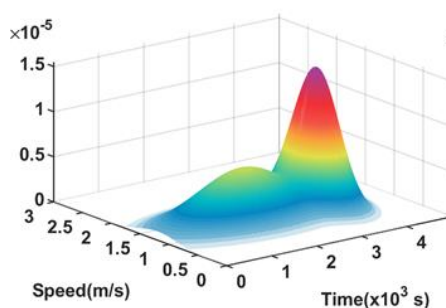
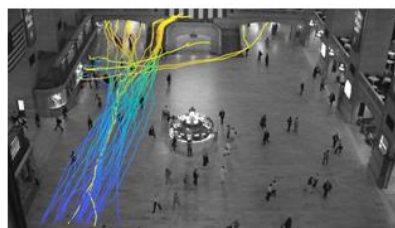
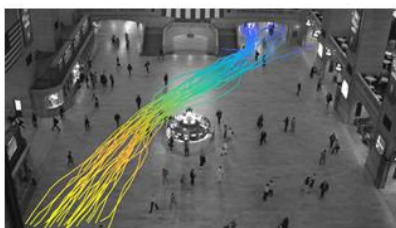
Red is observed. Green is our prediction. Black is the ground-truth. Blue is pedestrians. F_{goal} , F_{col} and F_{env} are shown as yellow, blue and black arrows.

拓展：基于视频的人群模拟

- Informative Scene Decomposition for Crowd Analysis, Comparison and Simulation Guidance

Experiment

– Visualization(conditioned on Space)



[demo](#)