# コンピュータグラフィクス論

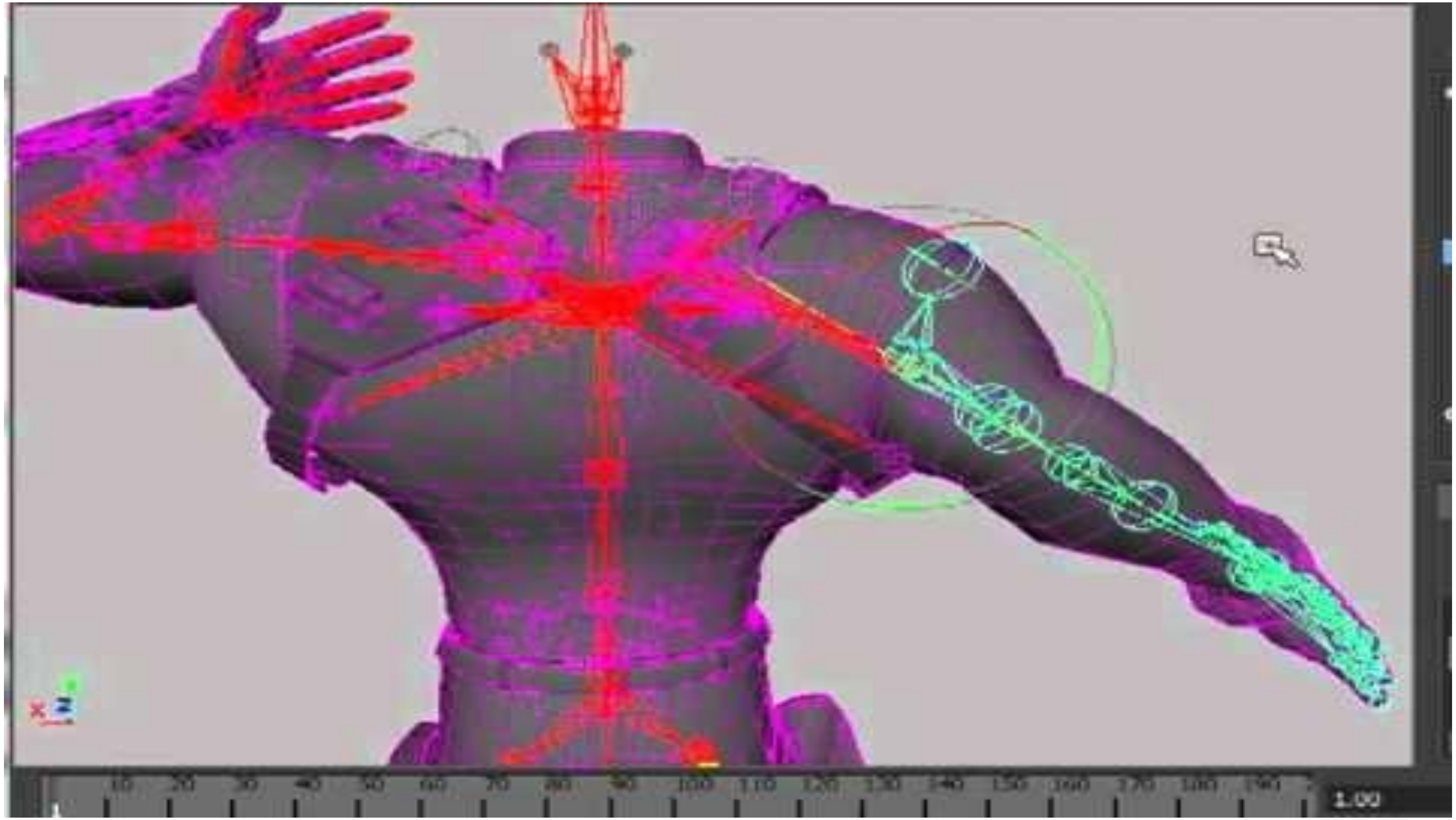
## – アニメーション(1) –

2016年5月19日

高山 健志

# スケルトンによるアニメーション

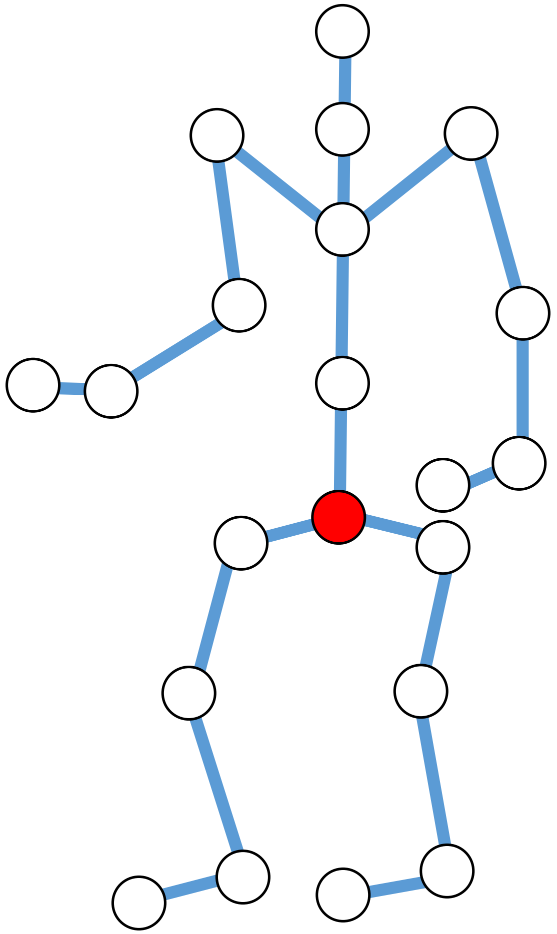
- 単純な仕組み
- 直感的な挙動
- 低い計算コスト



https://www.youtube.com/watch?v=DsoNab58QVA

# スケルトンによる姿勢の表現

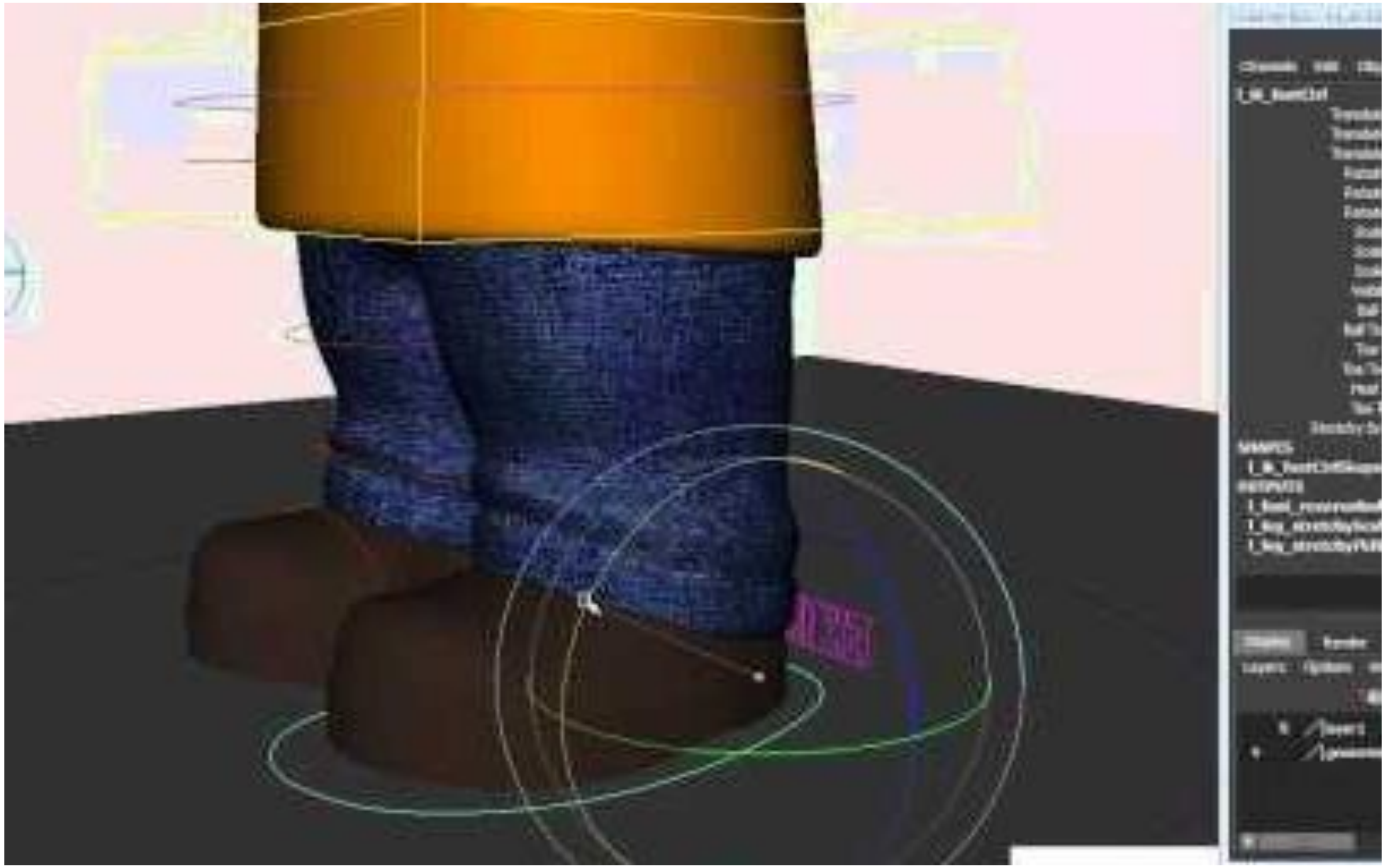
- ボーンと関節から成る木構造
- ボーンは親関節を基準とした相対的な回転角を保持
- 各関節の回転角によって全体の姿勢を決定
 (**F**orward **K**inematics)
- ロボティクス分野と深く関連



# Inverse Kinematics

- 末端関節の位置を与えると、それを満たす関節角を逆算

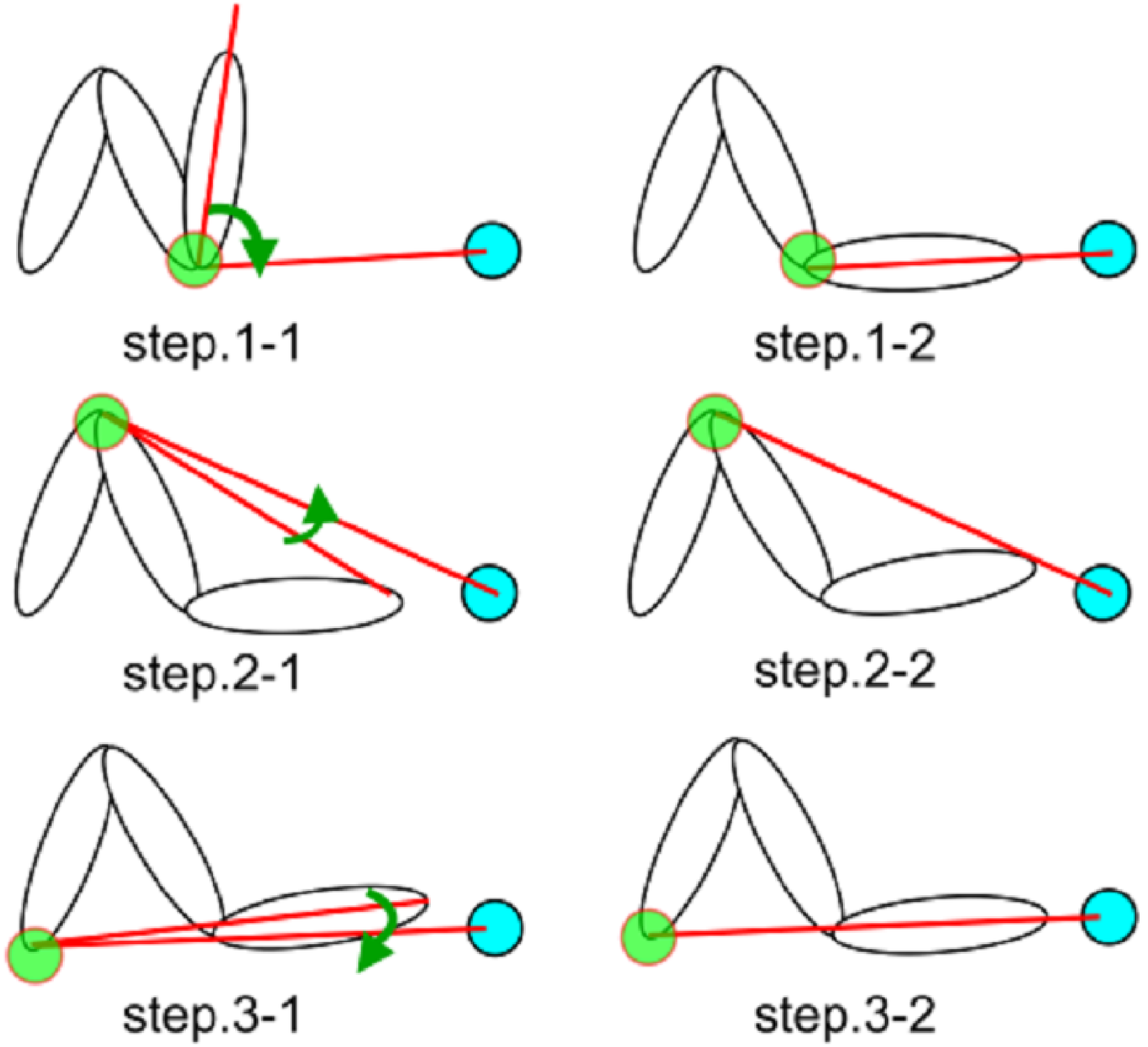
- IK で手早く姿勢を作り、FK で微調整



https://www.youtube.com/watch?v=e1qnZ9rV_kw

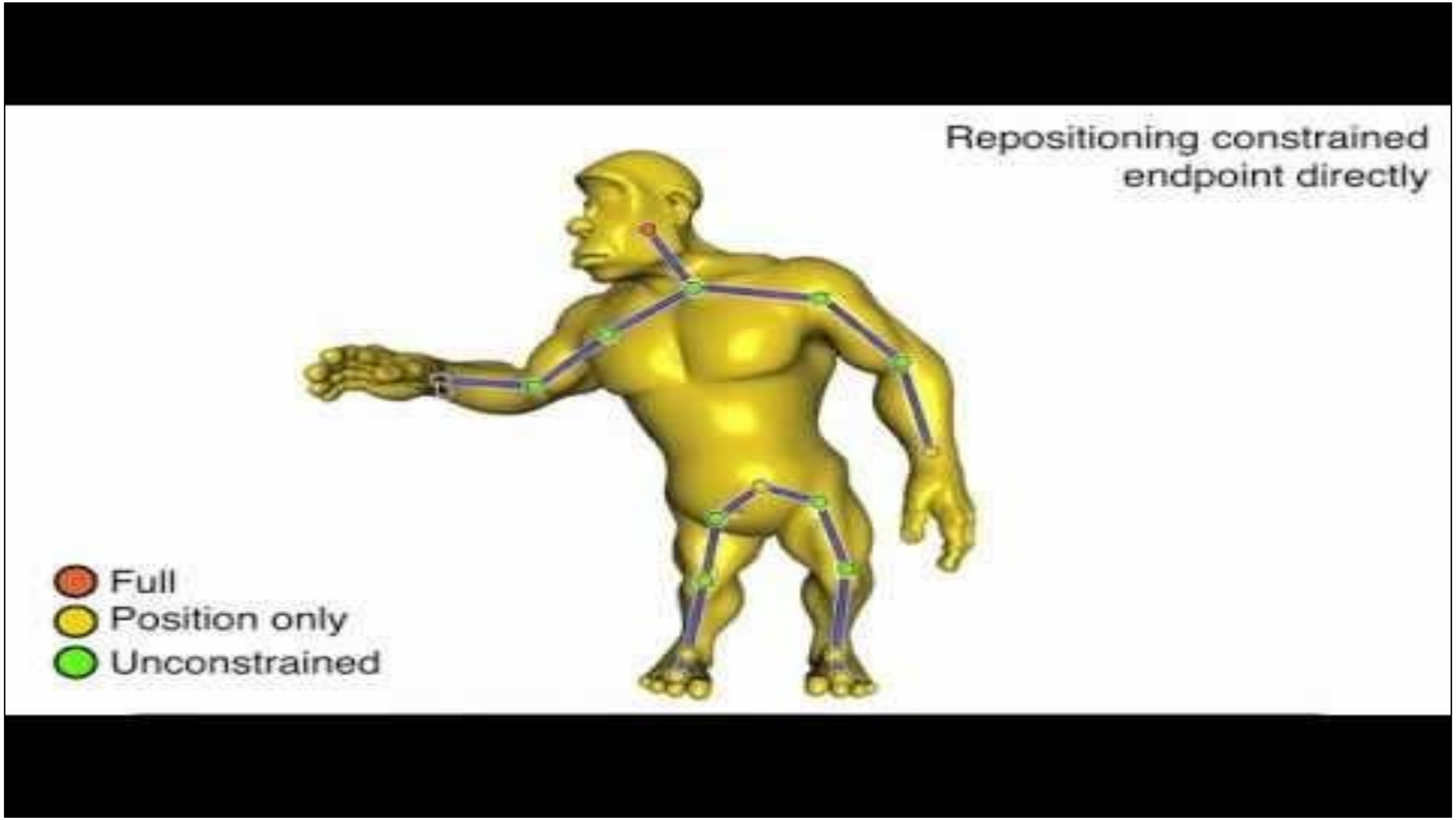
# IK の一解法：Cyclic Coordinate Descent

- 関節角を一つずつ順番に変更
  - 末端関節を目標に近づける
  - 順番が重要！末端が最初
- 実装が簡単 ➔ 基本課題 (デモ)
- より高度な手法
  - ヤコビ法 (方向等の様々な制約)
  - 変形エネルギーの最小化 [Jacobson 12]




http://mukai-lab.org/wp-content/uploads/2014/04/CcdParticleInverseKinematics.pdf

# 変形エネルギーに基づく IK



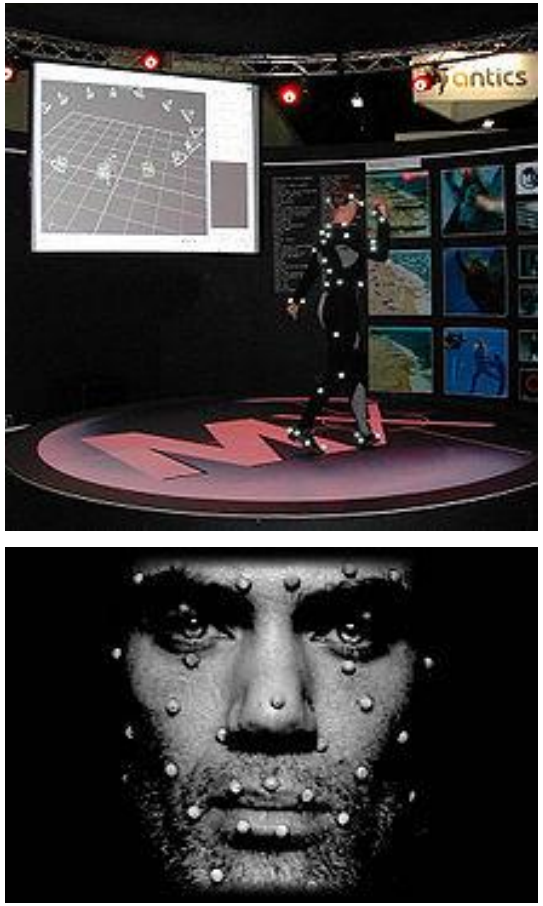

https://www.youtube.com/watch?v=PRcXy2LjI9I

Fast Automatic Skinning Transformations [Jacobson SIGGRAPH12]

# モーションデータの取得・生成方法

# 光学式モーションキャプチャ

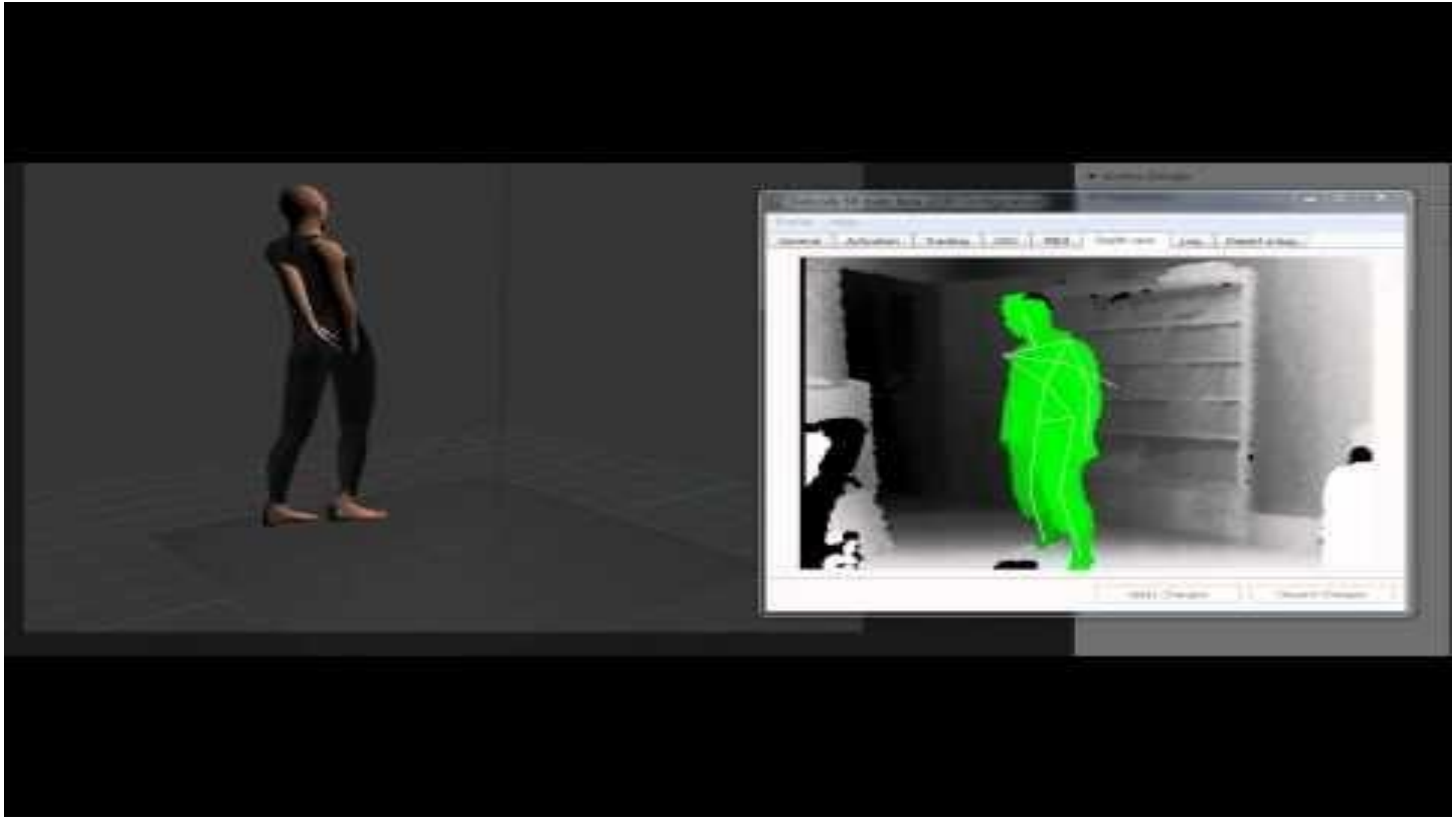
- 役者にマーカーを取り付け、多数 (~48) のカメラで撮影




from Wikipedia


https://www.youtube.com/watch?v=c6X64LhcUyQ

# 安価なデプスカメラによるモーキャプ



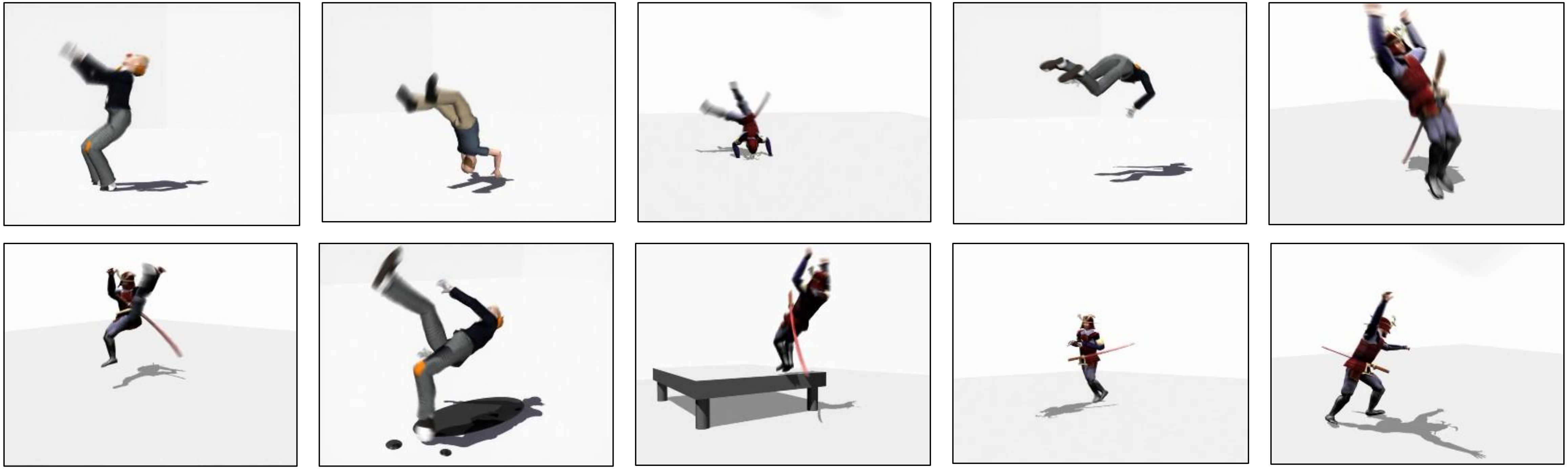
https://www.youtube.com/watch?v=qC-fdgPJhQ8

# 屋外で使えるモーキャプ

Motion Capture from Body-Mounted Cameras [Shiratori SIGGRAPH11]

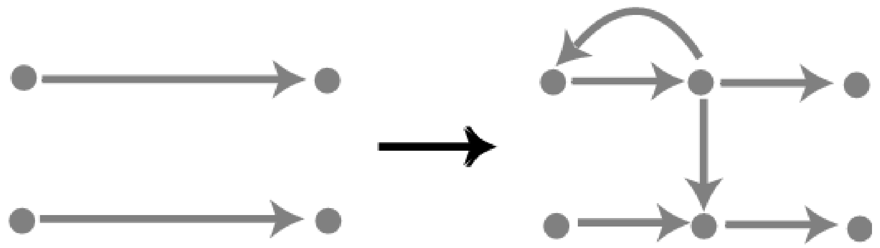
# モーションデータベース

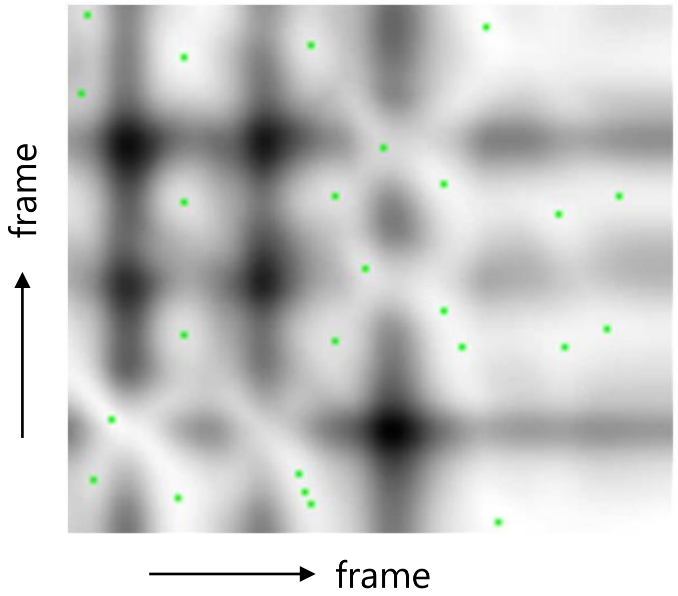
- http://mocap.cs.cmu.edu/
- 6 カテゴリ、合計 2605個
- 研究促進のために無償公開 (補間、連結、解析、検索、etc)



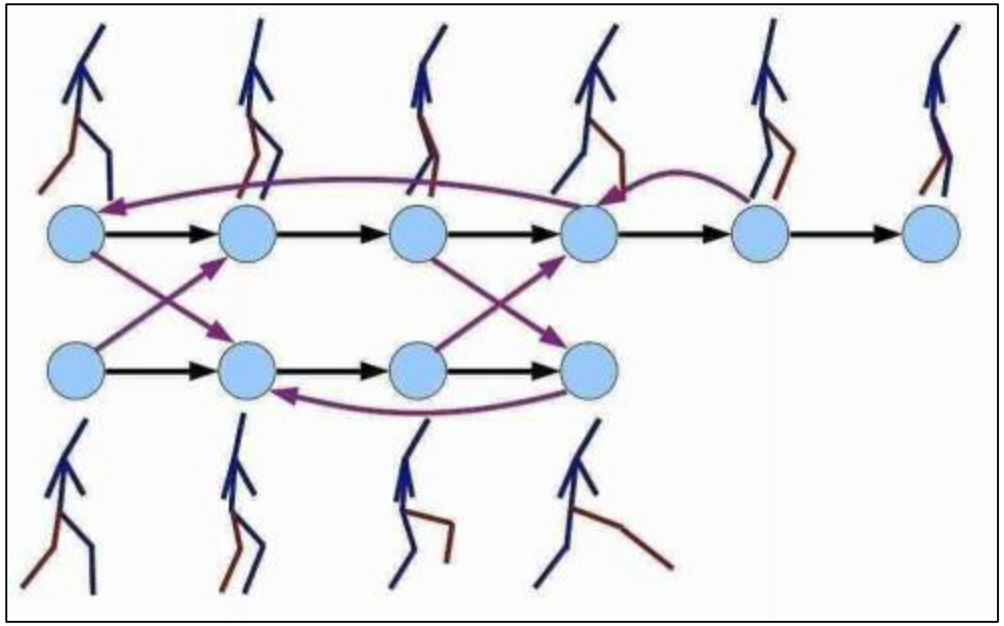
# モーションの連結

- 二つのフレームで姿勢が似ていれば、遷移を許す





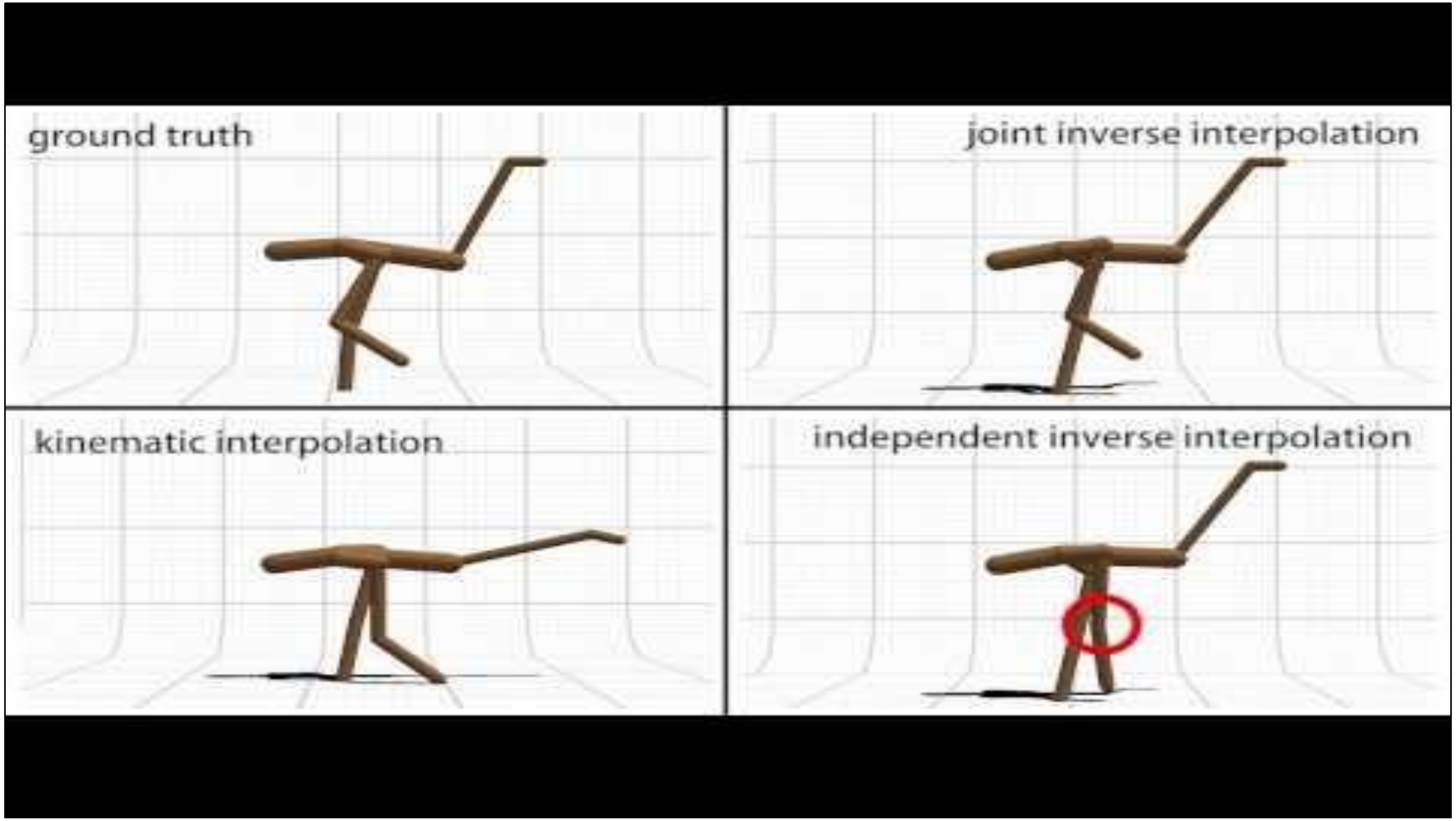

フレーム間の姿勢の類似度



Motion Graphs [Kovar SIGGRAPH02]
Motion Patches: Building Blocks for Virtual Environments Annotated with Motion Data [Lee SIGGRAPH06]
http://www.tcs.tifr.res.in/~workshop/thapar_igga/motiongraphs.pdf

# シミュレーションによるモーション生成

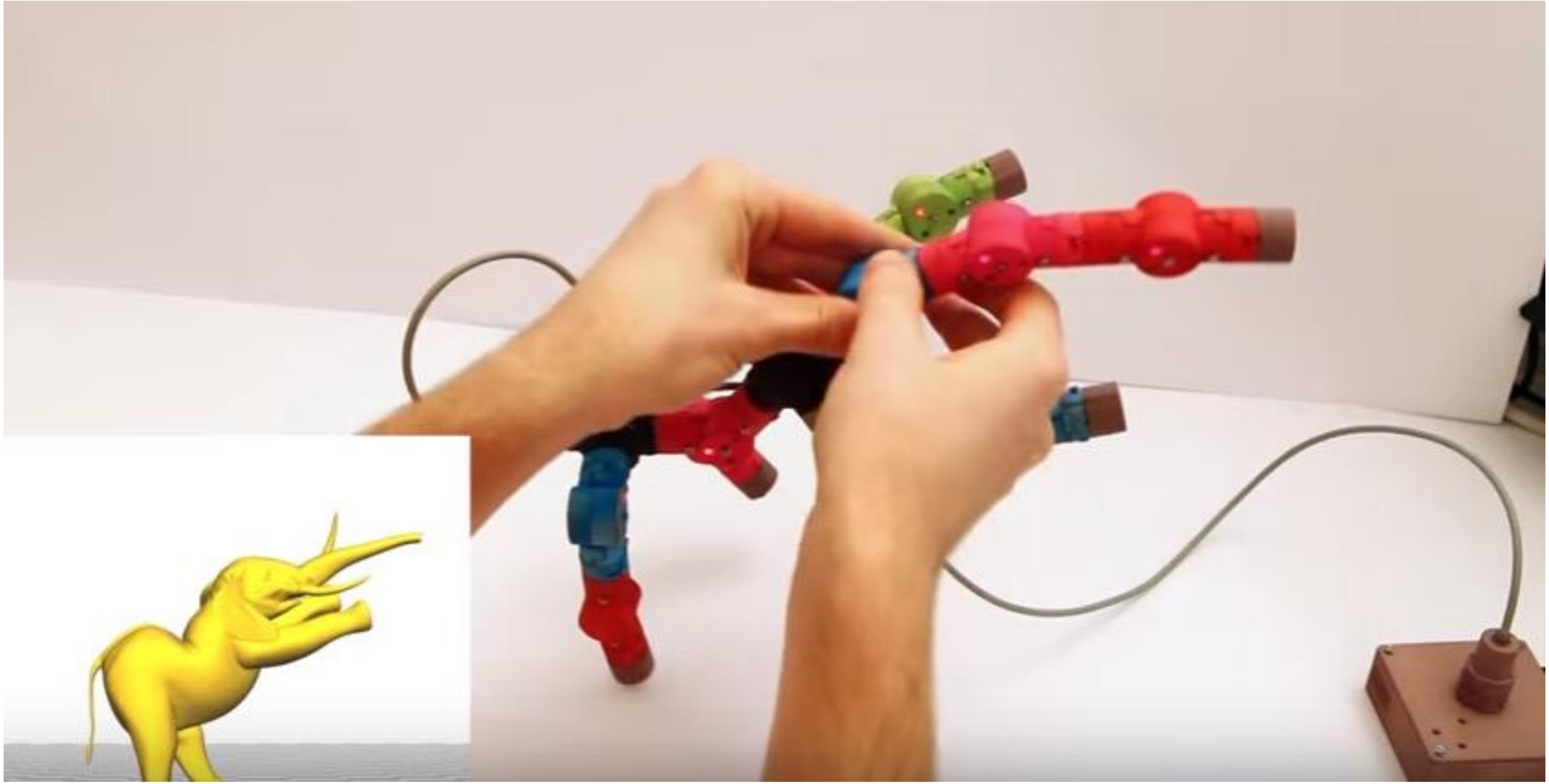
- モーキャプできない対象に使える
- 体型に合った自然な動作を生成できる
- 動的に変化する環境に適応できる




https://www.youtube.com/watch?v=KF_a1c7zytw

Generalizing Locomotion Style to New Animals With Inverse Optimal Regression [Wampler SIGGRAPH14]

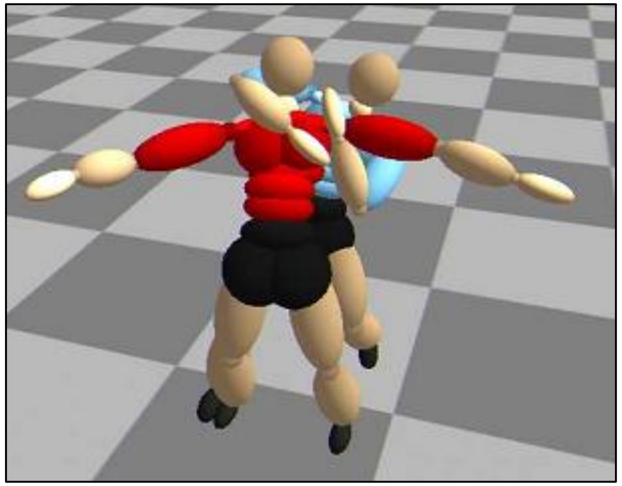
# 専用デバイスによるポーズ作成



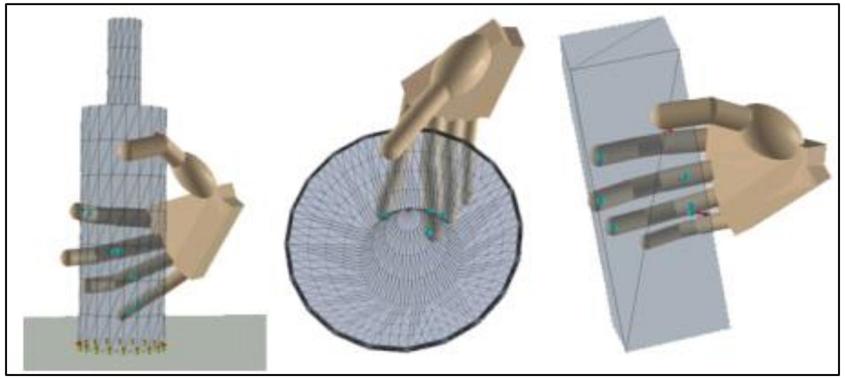
Tangible and Modular Input Device for Character Articulation [Jacobson SIGGRAPH14]
Rig Animation with a Tangible and Modular Input Device [Glauser SIGGRAPH16]

https://www.youtube.com/watch?v=vBX47JamMN0

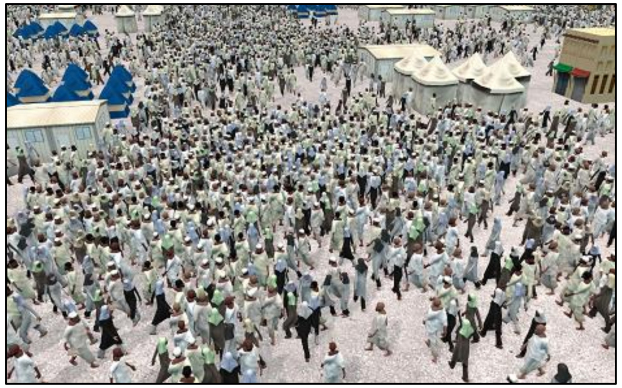
# キャラクタの動きに関する様々なトピック



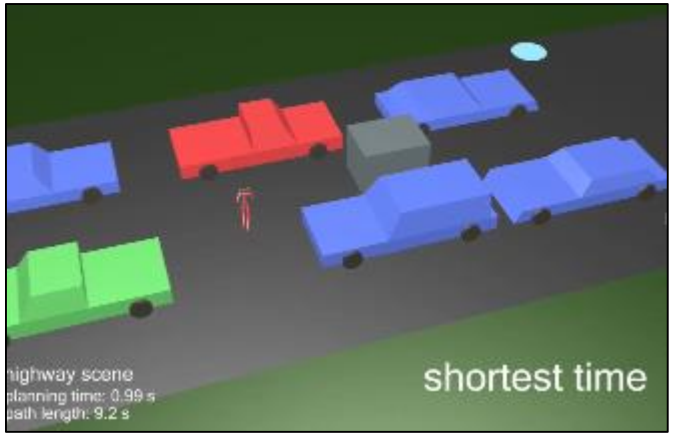
複数キャラクタの
インタラクション



物体をつかむ動作



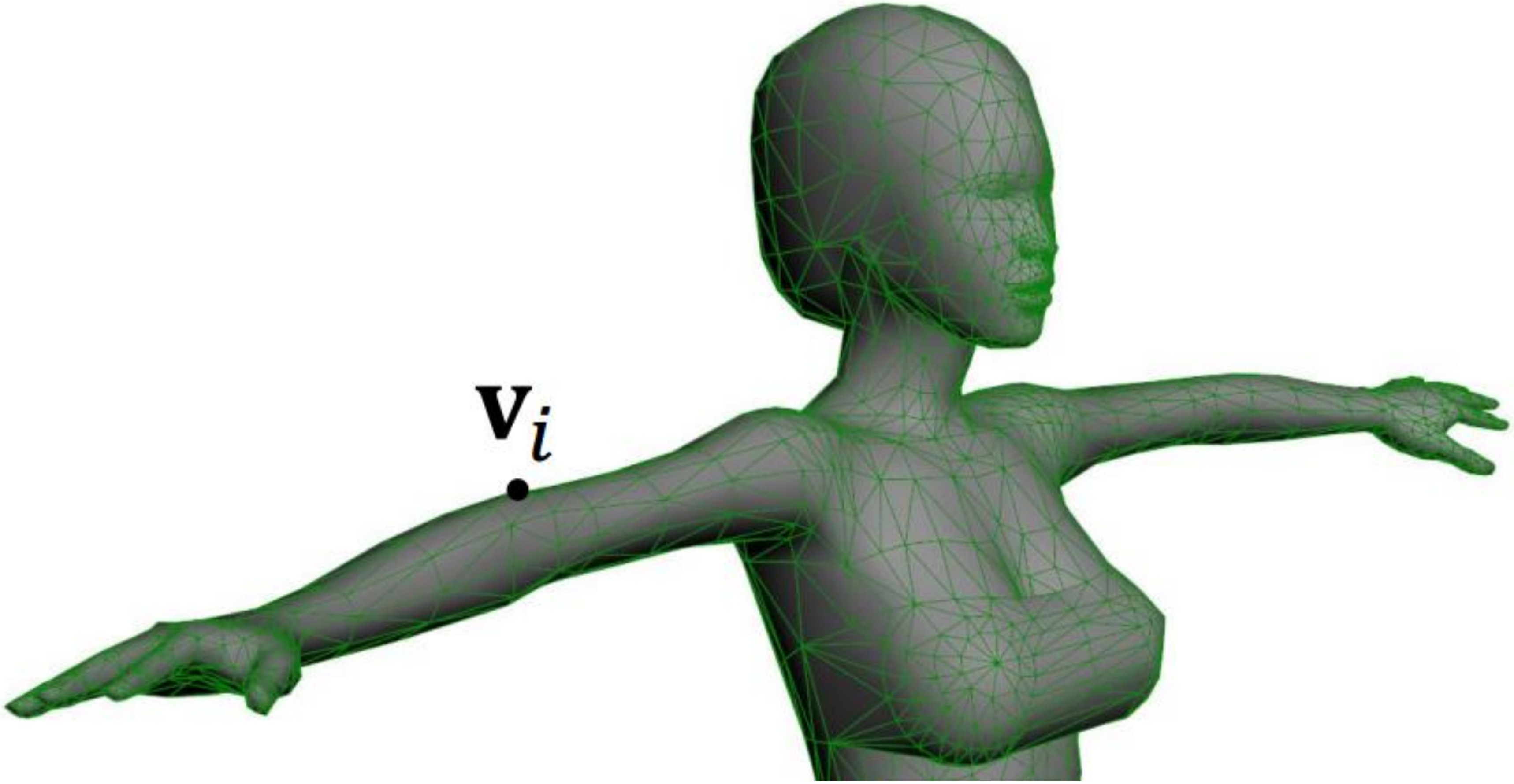
群衆シミュレーション

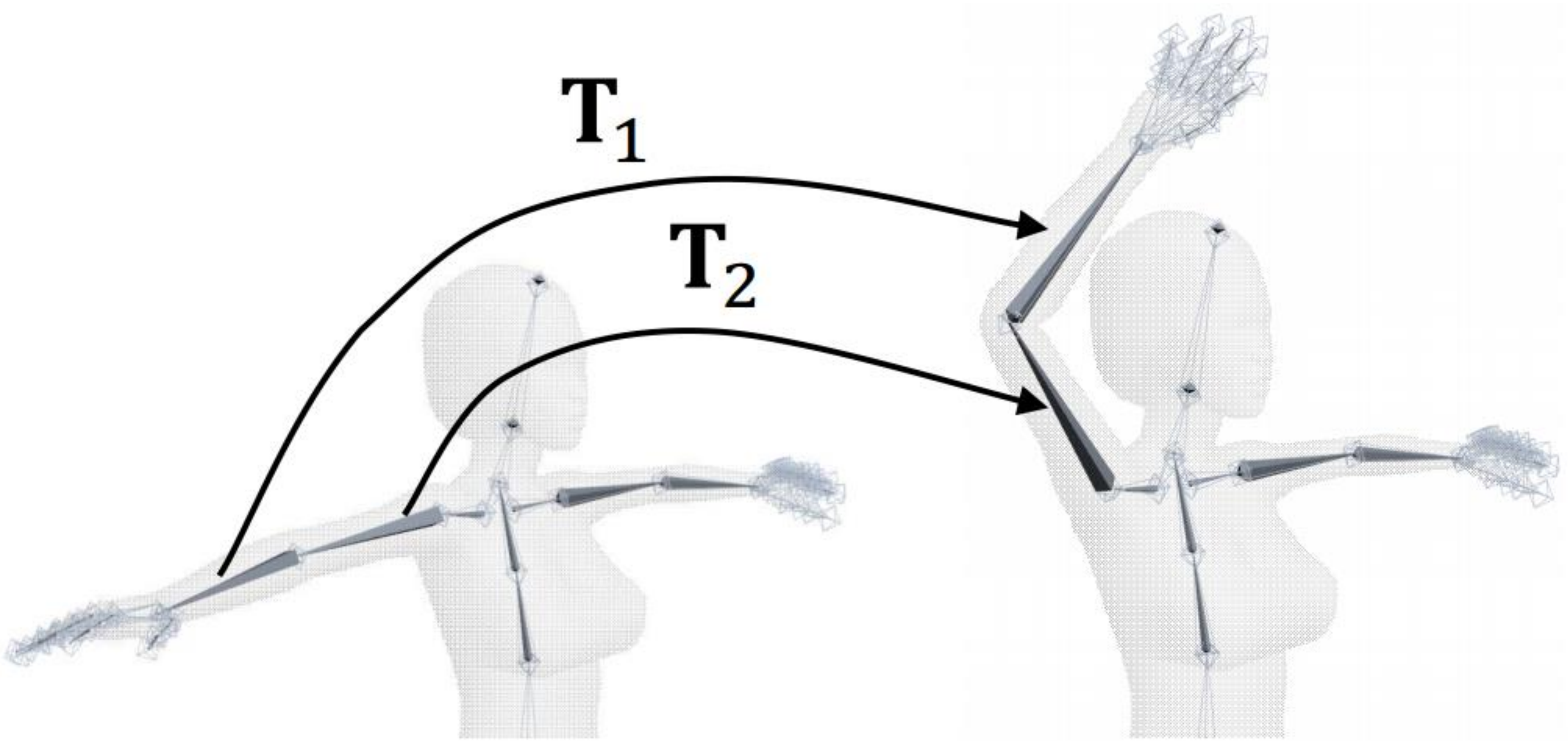


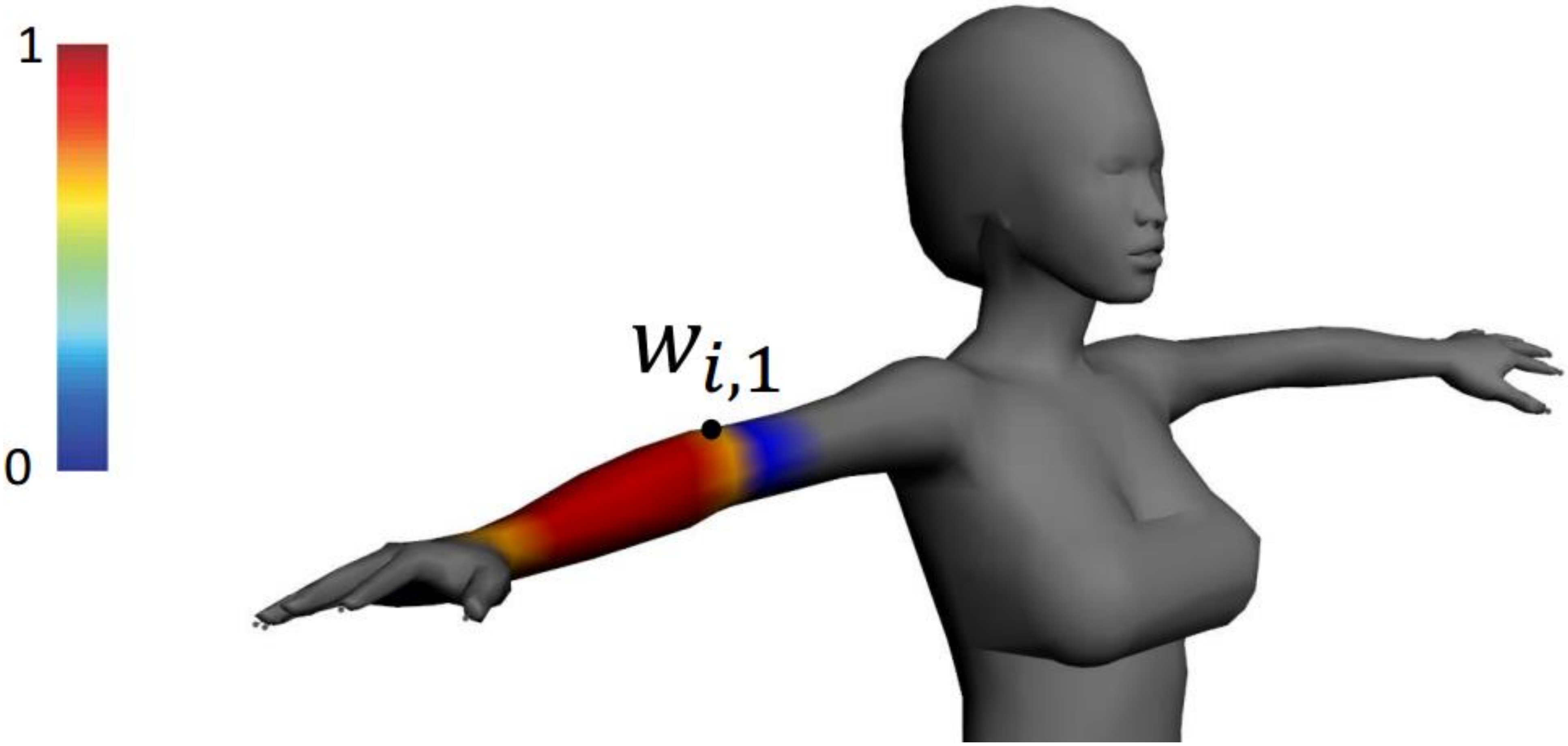

Path planning

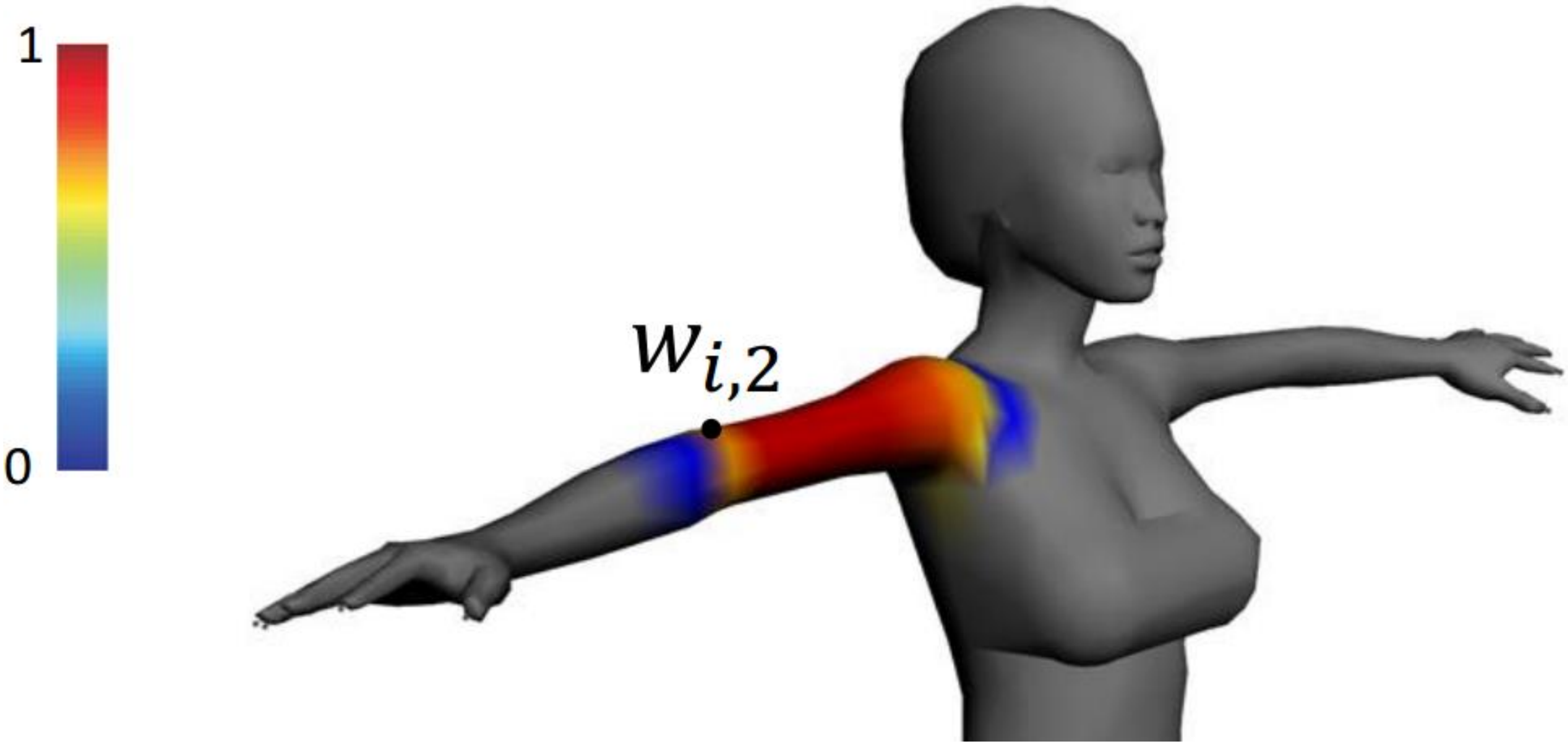
Character motion synthesis by topology coordinates [Ho EG09]
Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation [Narain SIGGRAPHAsia09]
Synthesis of Detailed Hand Manipulations Using Contact Sampling [Ye SIGGRAPH12]
Space-Time Planning with Parameterized Locomotion Controllers.[Levine TOG11]

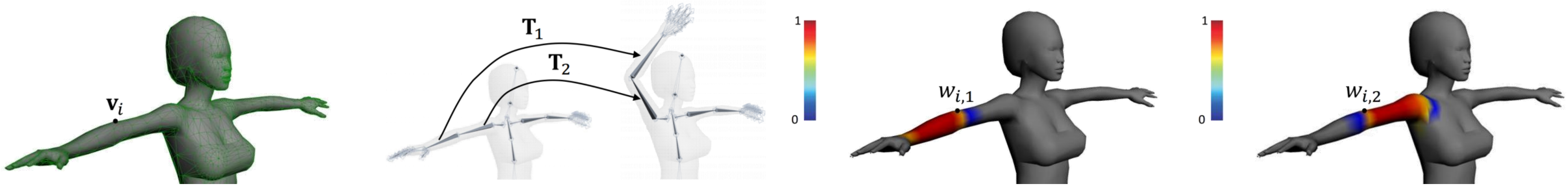
# スキニング


$\mathbf{v}_i$


$\mathbf{T}_1$
$\mathbf{T}_2$


1
0
$w_{i,1}$


1
0
$w_{i,2}$



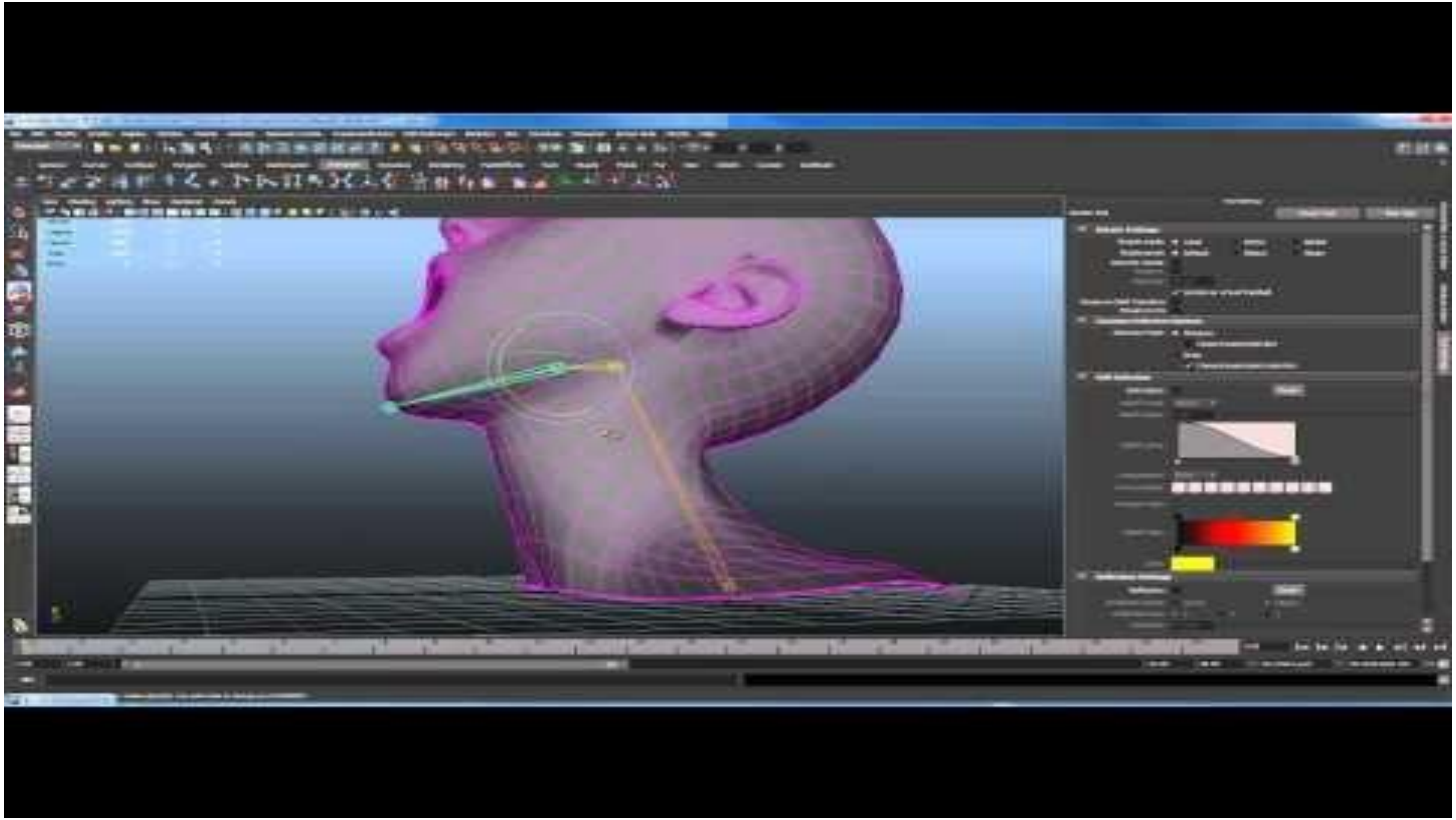

$$\mathbf{v}_i' = \mathrm{blend}\left(\langle w_{i,1}, \mathbf{T}_1 \rangle, \langle w_{i,2}, \mathbf{T}_2 \rangle, \dots \right)(\mathbf{v}_i)$$

- 入力
  - メッシュ頂点座標 $\{\mathbf{v}_i\}$ $i = 1, \dots, n$
  - ボーンの剛体変換 $\{\mathbf{T}_j\}$ $j = 1, \dots, m$
  - 各ボーンから各メッシュ頂点への重み $\{w_{i,j}\}$ $i = 1, \dots, n$ $j = 1, \dots, m$

- 出力
  - 変形後のメッシュ頂点座標 $\{\mathbf{v}_i'\}$ $i = 1, \dots, n$

- 技術的なポイント
  - 重み $\{w_{i,j}\}$ をどう与えるか
  - 変換をどうブレンドするか

# 重みの与え方：手作業でペイント



https://www.youtube.com/watch?v=TACB6bX8SN0

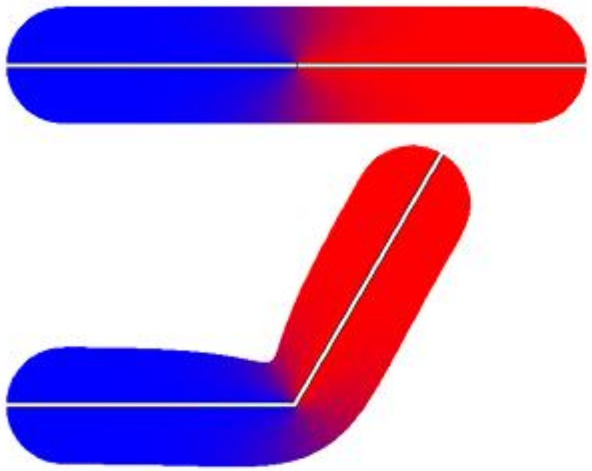
# 重みの与え方：自動計算

- j 番目のボーンの重み $w_j$ を、
  - j 番目のボーン上で 1 を取り、それ以外のボーン上で 0 を取り、
  - それ以外では滑らかなスカラー場

  として定式化

- 一階微分 $\int_\Omega \|\nabla w_j\|^2 dA$ を最小化 [Baran 07]
  - サーフェス上で近似的に解く ➔ 簡単、高速

- 二階微分 $\int_\Omega (\Delta w_j)^2 dA$ を最小化 [Jacobson 11]
  - 不等式制約 $0 \le w_j \le 1$ も導入
  - ボリューム上で二次計画問題を解く ➔ 高品質



Pinocchio デモ

Automatic rigging and animation of 3d characters [Baran SIGGRAPH07]
Bounded Biharmonic Weights for Real-Time Deformation [Jacobson SIGGRAPH11]

# 変換の混合手法：**L**inear **B**lend **S**kinning

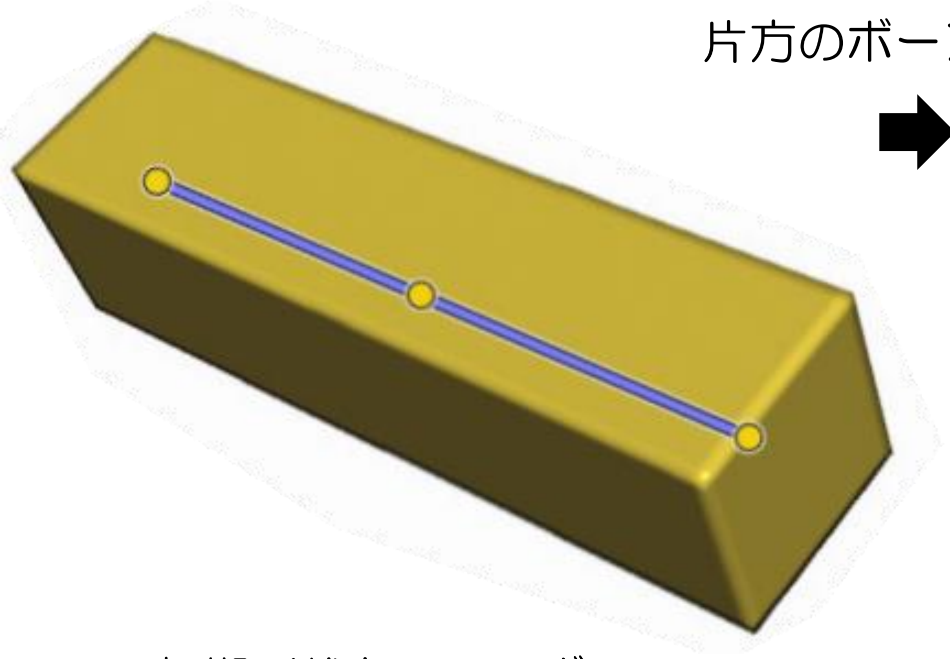
- 剛体変換 $\mathbf{T}_j$ は、回転行列 $\mathbf{R}_j \in \mathbb{R}^{3\times3}$ と移動ベクトル $\mathbf{t}_j \in \mathbb{R}^3$ を並べた 3×4行列として表される

$$\mathbf{v}'_i = \left( \sum_j w_{i,j} \begin{pmatrix} \mathbf{R}_j & \mathbf{t}_j \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} \mathbf{v}_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

- 単純で高速
  - 頂点シェーダで実装：フレーム毎に $\{\mathbf{v}'_i\}$ を GPU に送るのではなく、初期化時に $\{\mathbf{v}_i\}$ と $\{w_{i,j}\}$ を送り、フレーム毎に $\{\mathbf{T}_j\}$ を送る

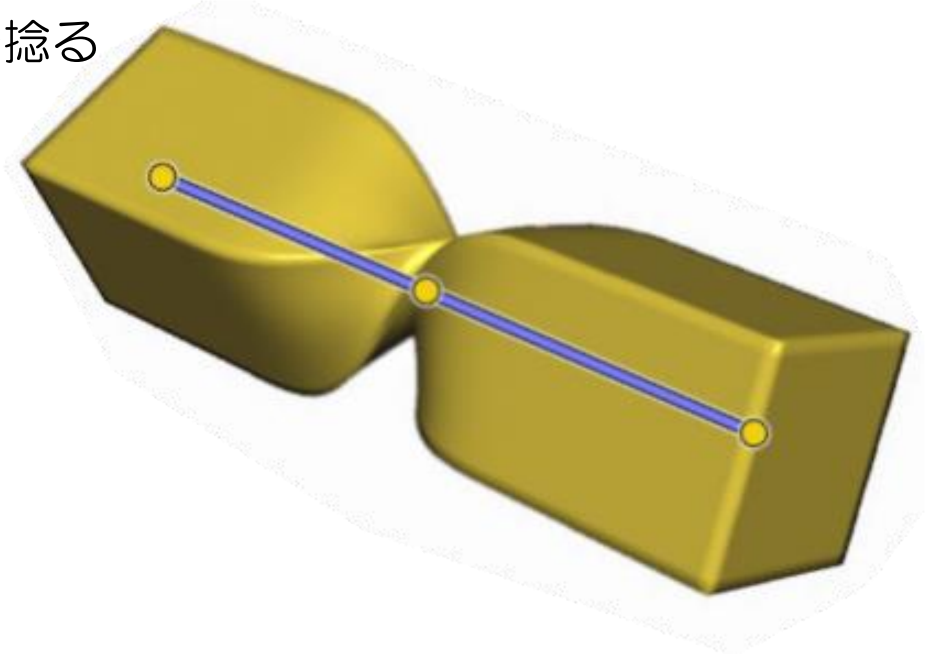
- 業界で最も一般的

# LBS の欠陥："candy wrapper" effect



初期形状と二つのボーン

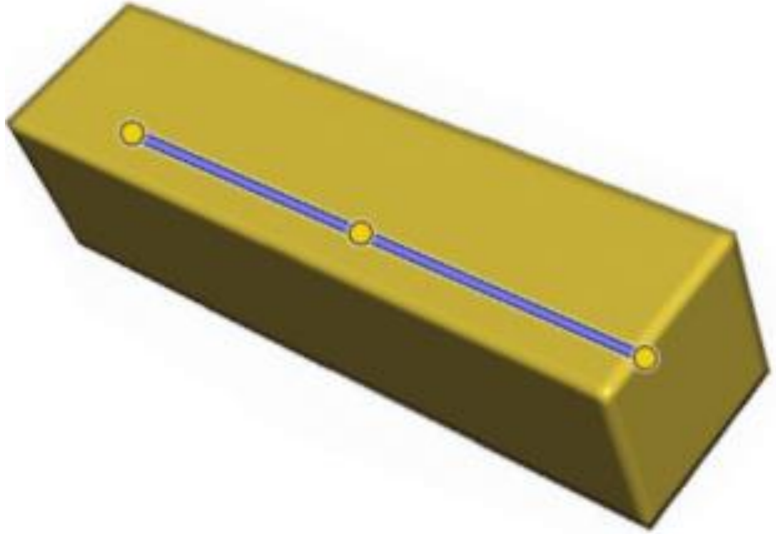
片方のボーンを捻る



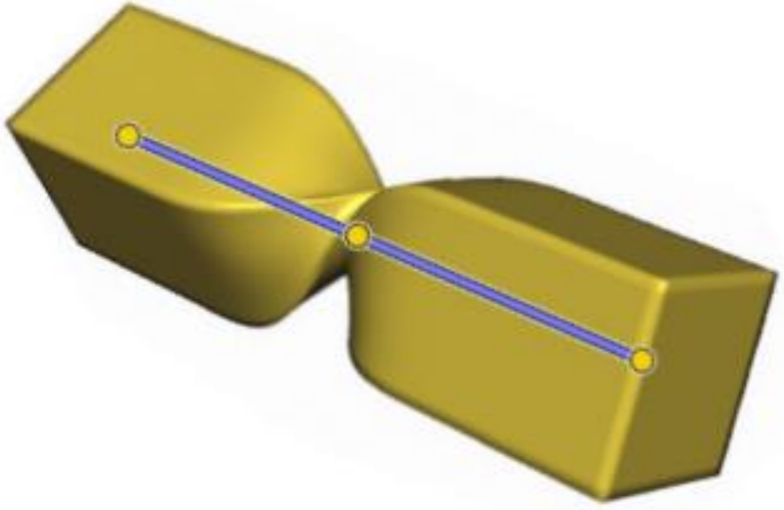
LBS による変形

- 剛体変換の線形和は剛体変換にならない！
  - 180度捻ると関節の周りが一点に凝縮

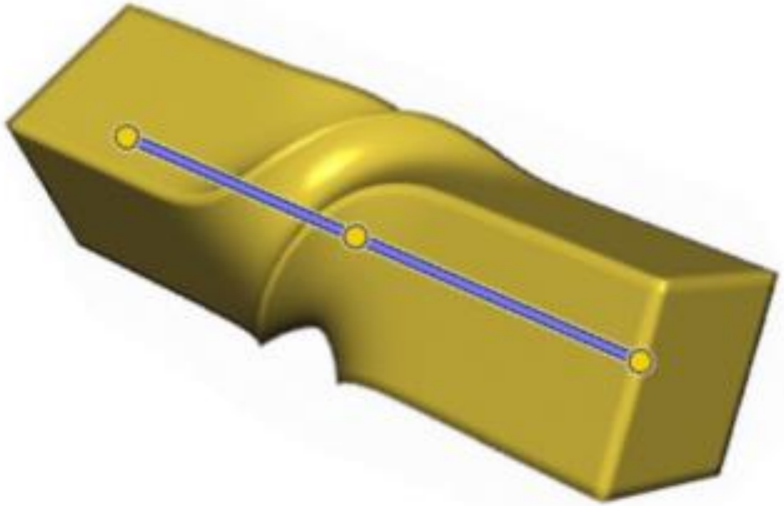
# LBS に代わる手法：**D**ual **Q**uaternion **S**kinning



初期形状



LBS による変形



DQS による変形

- アイディア
  - Quaternion (四つの実数) ➔ 3D 回転変換
  - Dual quaternion (二つの quaternion) ➔ 3D 剛体変換 (回転 + 移動)

# Dual number と dual quaternion

- Dual number
  - $\varepsilon^2 = 0$ という演算規則を持つ dual 単位 $\varepsilon$ を導入 (cf. 虚数単位 $i$)
  - Primal 成分と dual 成分 の和として dual number を定義：　$\hat{a} \coloneqq a_0 + \varepsilon a_\varepsilon$

$a_0, a_\varepsilon \in \mathbb{R}$

    - Dual 共役：　$\bar{\hat{a}} = \overline{a_0 + \varepsilon a_\varepsilon} = a_0 - \varepsilon a_\varepsilon$

- Dual quaternion
  - Quaternionの 各成分が dual number であるようなもの
  - 二つの quaternion を使って書ける　$\hat{\mathbf{q}} \coloneqq \mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon$
    - Dual 共役：　$\bar{\hat{\mathbf{q}}} = \overline{\mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon} = \mathbf{q}_0 - \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon$
    - Quaternion 共役：　$\hat{\mathbf{q}}^* = (\mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon)^* = \mathbf{q}_0^* + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon^*$

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

# Dual number / quaternion の演算規則

- Dual number $\hat{a} = a_0 + \varepsilon a_\varepsilon$ について：
  - 逆数 $\frac{1}{\hat{a}} = \frac{1}{a_0} - \varepsilon \frac{a_\varepsilon}{a_0^2}$
  - 平方根 $\sqrt{\hat{a}} = \sqrt{a_0} + \varepsilon \frac{a_\varepsilon}{2\sqrt{a_0}}$
  - 三角関数 $\sin \hat{a} = \sin a_0 + \varepsilon a_\varepsilon \cos a_0$
    $\cos \hat{a} = \cos a_0 - \varepsilon a_\varepsilon \sin a_0$

普通の四則演算と新しい規則 $\varepsilon^2 = 0$ を適用すれば、簡単に導出できる

テイラー展開より導出

- Dual quaternion $\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon$ について：
  - ノルム $\|\hat{\mathbf{q}}\| = \sqrt{\hat{\mathbf{q}}^* \hat{\mathbf{q}}} = \|\mathbf{q}_0\| + \varepsilon \frac{\langle \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_\varepsilon \rangle}{\|\mathbf{q}_0\|}$ 4Dベクトルとしての内積
  - 逆元 $\hat{\mathbf{q}}^{-1} = \frac{\hat{\mathbf{q}}^*}{\|\hat{\mathbf{q}}\|^2}$
  - $\|\hat{\mathbf{q}}\| = 1$ となるものを単位 dual quaternion と呼ぶ
    - $\Leftrightarrow \|\mathbf{q}_0\| = 1$ かつ $\langle \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_\varepsilon \rangle = 0$

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

# Dual quaternion による剛体変換

- 平行移動成分が $\vec{\mathbf{t}} = \left(t_x, t_y, t_z\right)$ で、回転成分が $\mathbf{q}_0$ (単位quaternion)であるような剛体変換を表す単位 dual quaternion：

$$\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0$$

注意：3Dベクトルは、実数成分を持たないquaternionと見なす

- 単位 dual quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ による、3D座標 $\vec{\mathbf{v}} = \left(v_x, v_y, v_z\right)$ の剛体変換：

$$\hat{\mathbf{q}}(1 + \varepsilon\vec{\mathbf{v}})\overline{\hat{\mathbf{q}}^*} = 1 + \varepsilon\overrightarrow{\mathbf{v}'}$$

  - $\overrightarrow{\mathbf{v}'}$ が変換後の3D座標

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

# Dual quaternion による剛体変換

- $\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0$

- $$\begin{aligned}\hat{\mathbf{q}}(1+\varepsilon\vec{\mathbf{v}})\overline{\hat{\mathbf{q}}^*} &= \left(\mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0\right)(1+\varepsilon\vec{\mathbf{v}})\left(\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2}\mathbf{q}_0^*\vec{\mathbf{t}}\right) \\ &= \left(\mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0\right)\left(\mathbf{q}_0^* + \varepsilon\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2}\mathbf{q}_0^*\vec{\mathbf{t}}\right) \\ &= \mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^* + \varepsilon\mathbf{q}_0\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2}\mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^*\vec{\mathbf{t}} \\ &= 1 + \varepsilon\left(\vec{\mathbf{t}} + \mathbf{q}_0\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^*\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\left((0+\vec{\mathbf{t}})\mathbf{q}_0\right)^* &= \mathbf{q}_0^*(0+\vec{\mathbf{t}})^* \\ &= -\mathbf{q}_0^*\vec{\mathbf{t}}\end{aligned}$$

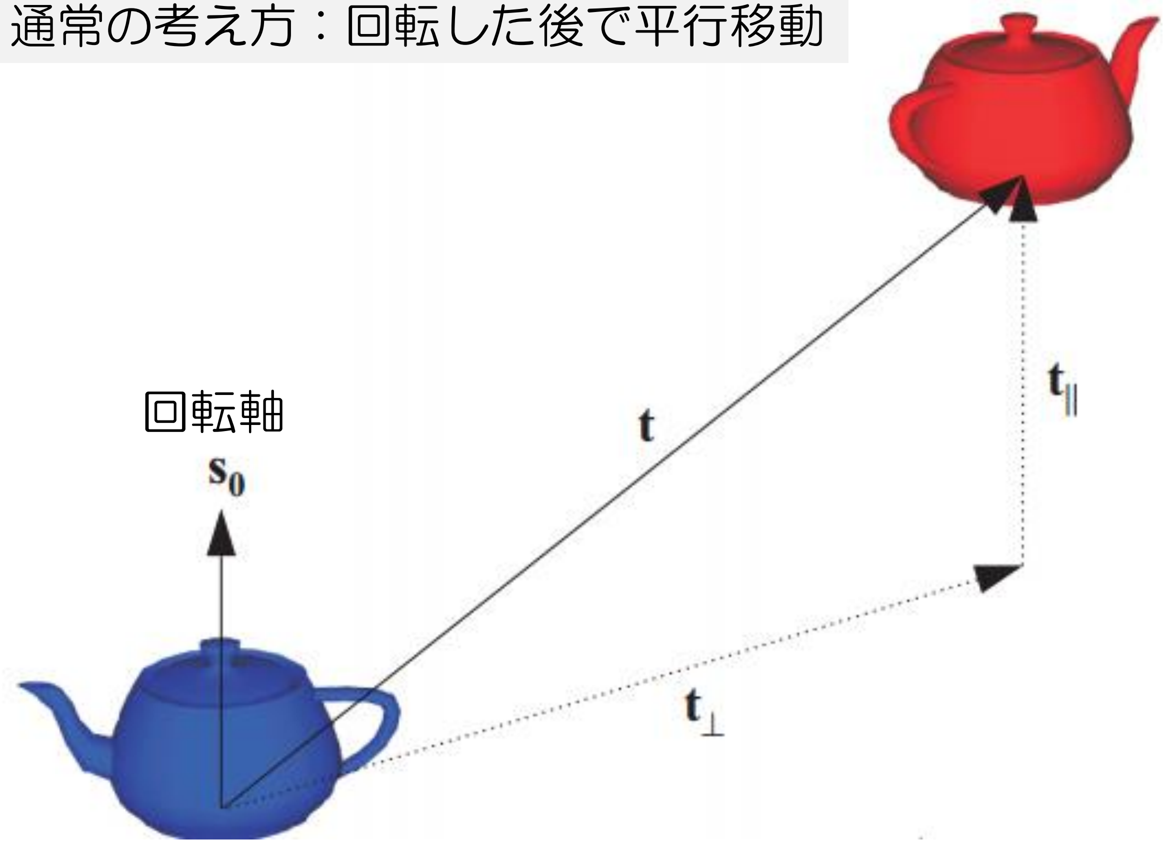
$\|\mathbf{q}_0\|^2 = 1$

3D座標 $\vec{\mathbf{v}}$ をquaternion $\mathbf{q}_0$ で回転した結果

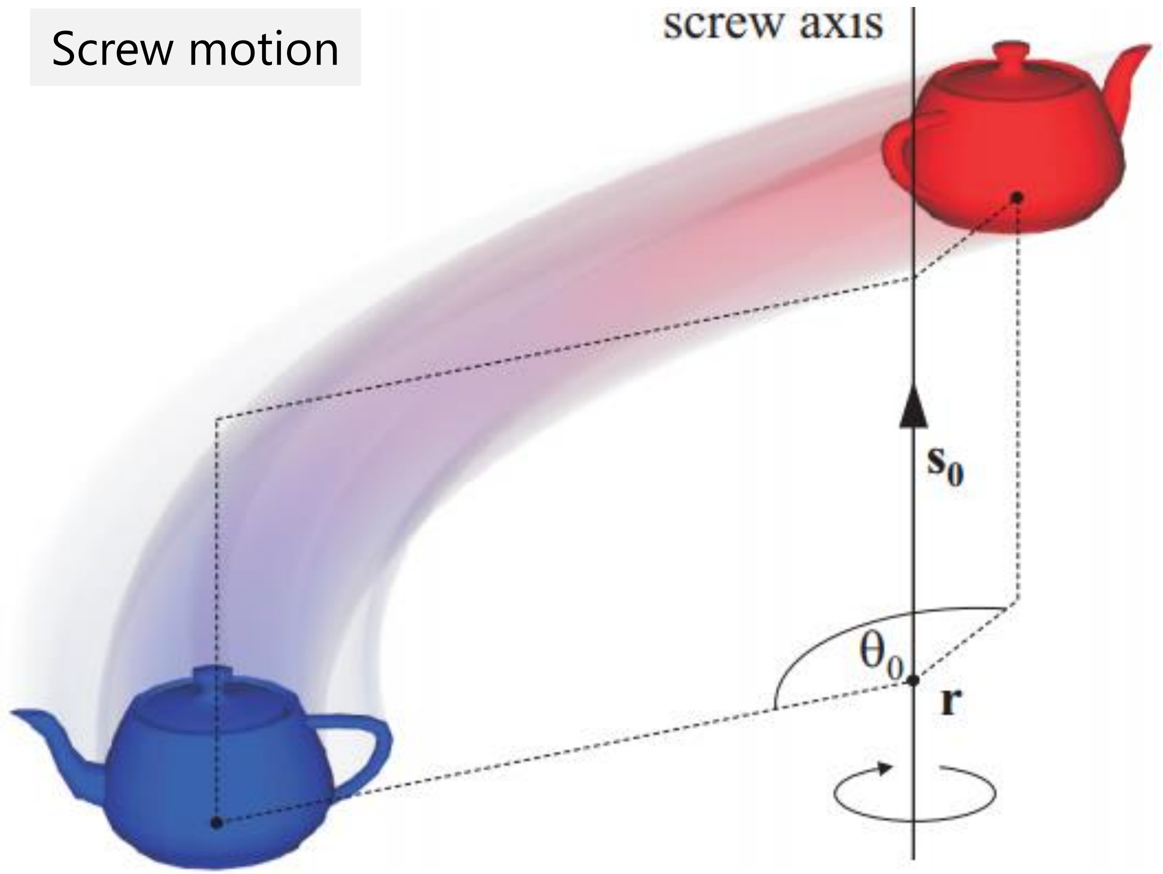
Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

# “Screw motion” としての剛体運動

通常の考え方：回転した後で平行移動




Screw motion




- 任意の剛体運動は、screw motion として一意に記述できる

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

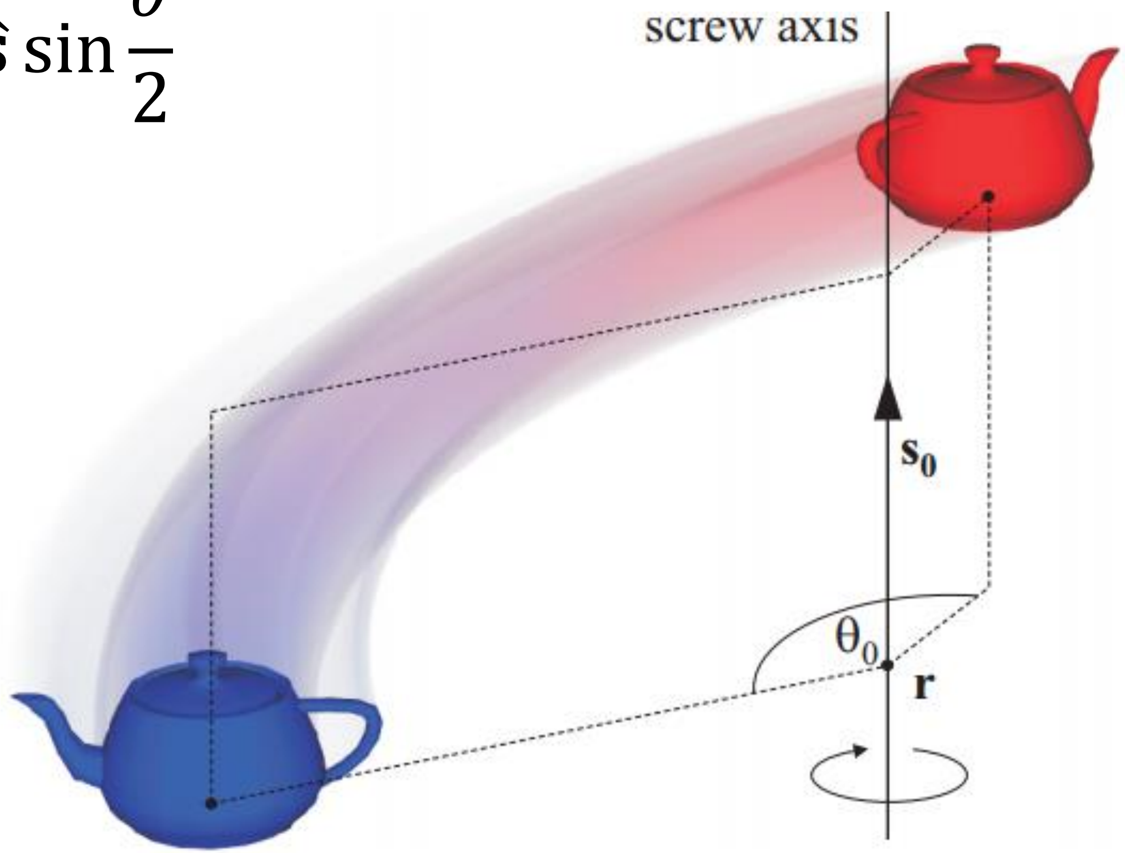
# Screw motion と dual quaternion

- 単位 dual quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ は、以下の形で表せる：

$$\hat{\mathbf{q}} = \cos\frac{\hat{\theta}}{2} + \hat{\mathbf{s}}\sin\frac{\hat{\theta}}{2}$$

  - $\hat{\theta} = \theta_0 + \varepsilon\theta_\varepsilon$　　$\theta_0, \theta_\varepsilon$：実数
  - $\hat{\mathbf{s}} = \overrightarrow{\mathbf{s}_0} + \varepsilon\overrightarrow{\mathbf{s}_\varepsilon}$　　$\overrightarrow{\mathbf{s}_0}, \overrightarrow{\mathbf{s}_\varepsilon}$：単位3Dベクトル

- 幾何的な意味
  - $\overrightarrow{\mathbf{s}_0}$：回転軸方向
  - $\theta_0$　：回転量
  - $\theta_\varepsilon$　：回転軸方向の平行移動量
  - $\overrightarrow{\mathbf{s}_\varepsilon}$：回転軸が$\vec{\mathbf{r}}$ を通るとき、
    $\overrightarrow{\mathbf{s}_\varepsilon} = \vec{\mathbf{r}} \times \overrightarrow{\mathbf{s}_0}$を満たす




Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

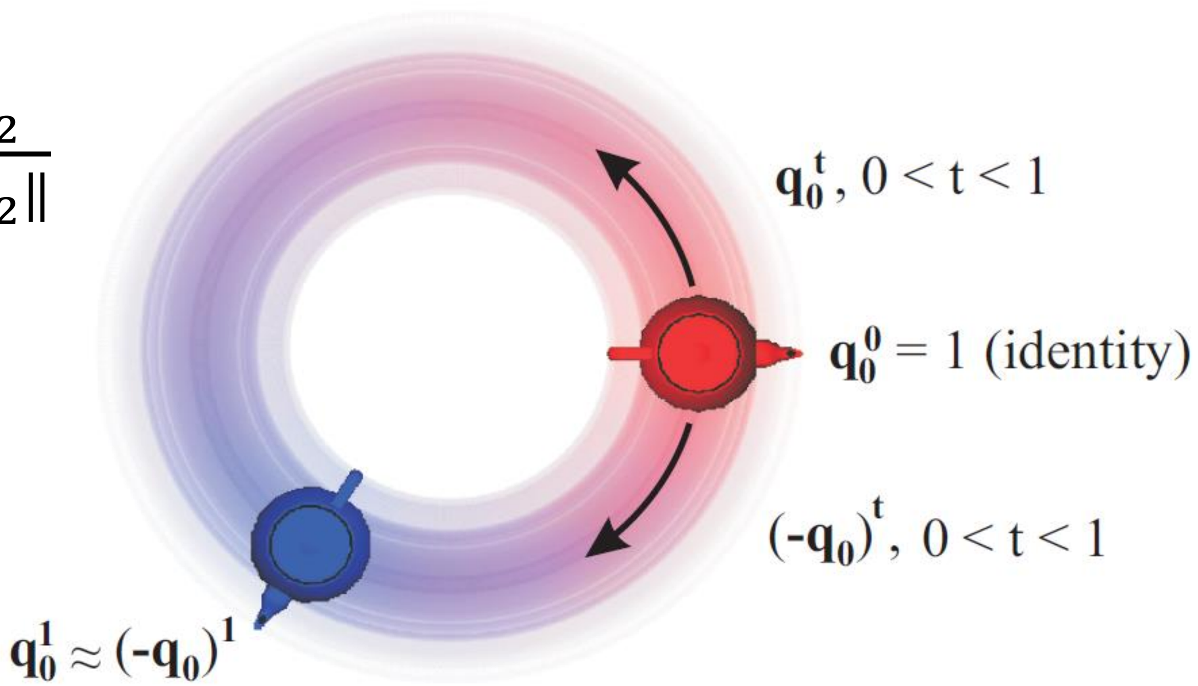
# 二つの剛体変換の補間

- 線形補間＋正規化 (nlerp)

$$\mathrm{nlerp}(\hat{\mathbf{q}}_1, \hat{\mathbf{q}}_2, t) := \frac{(1-t)\hat{\mathbf{q}}_1 + t\hat{\mathbf{q}}_2}{\|(1-t)\hat{\mathbf{q}}_1 + t\hat{\mathbf{q}}_2\|}$$

- 注意：$\hat{\mathbf{q}}$と$-\hat{\mathbf{q}}$は同じ剛体変換を表すが、過程が正反対

- $\hat{\mathbf{q}}_1$ と $\hat{\mathbf{q}}_2$ それぞれの non-dual な quaternion の 4D 内積が負であれば、$\hat{\mathbf{q}}_1$ の補間相手を $-\hat{\mathbf{q}}_2$ とする



# Dual quaternion による剛体変換のブレンド

$$\text{blend}(\langle w_1, \hat{\mathbf{q}}_1\rangle, \langle w_2, \hat{\mathbf{q}}_2\rangle, \dots) \coloneqq \frac{w_1\hat{\mathbf{q}}_1 + w_2\hat{\mathbf{q}}_2 + \cdots}{\|w_1\hat{\mathbf{q}}_1 + w_2\hat{\mathbf{q}}_2 + \cdots\|}$$

- Quaternion による回転と同様
- 入力データ形式が LBS と同一、計算コスト低い
- 市販CGソフトの多くに標準装備

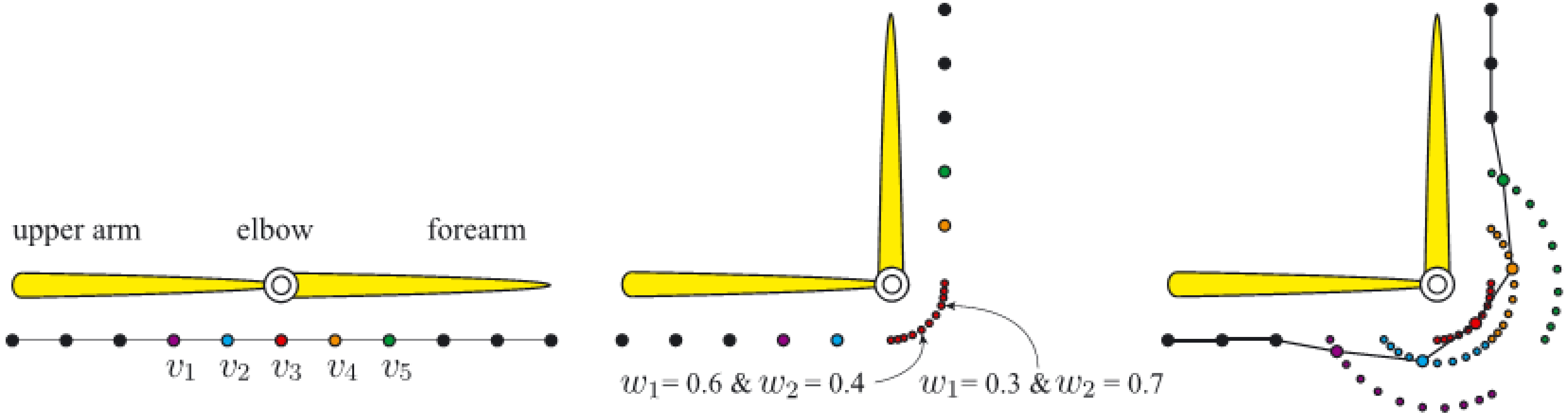

197.4 FPS

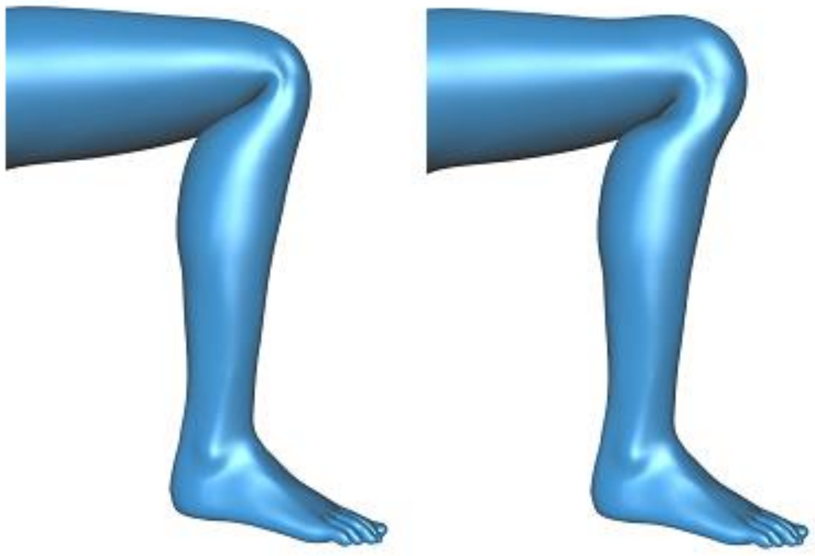

122 FPS

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

# DQS の欠点：”bulging” effect

- 曲げの際に、関節を中心とした球面上に沿ったような軌跡を描く

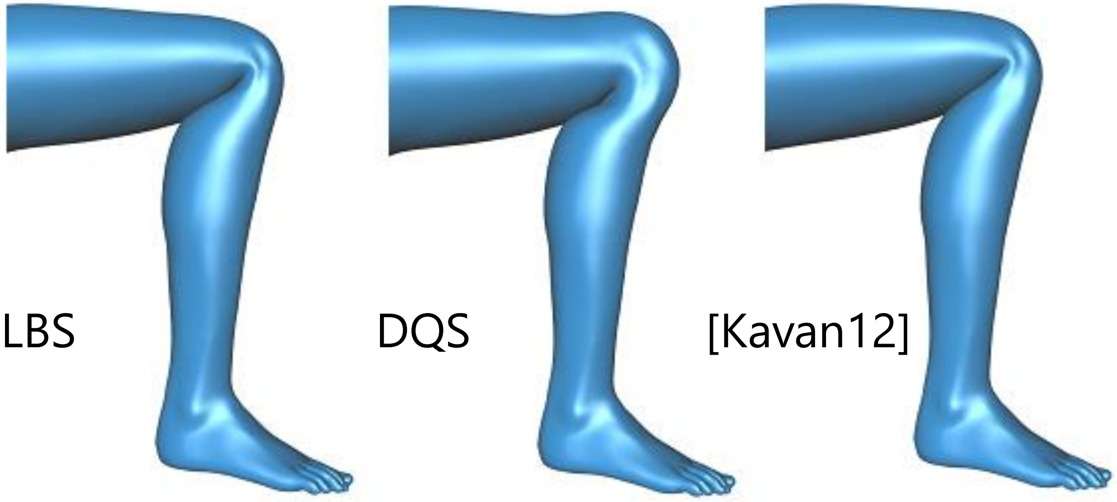


LBS DQS

Elasticity-Inspired Deformers for Character Articulation [Kavan SIGGRAPHAsia12]
Bulging-free dual quaternion skinning [Kim CASA14]

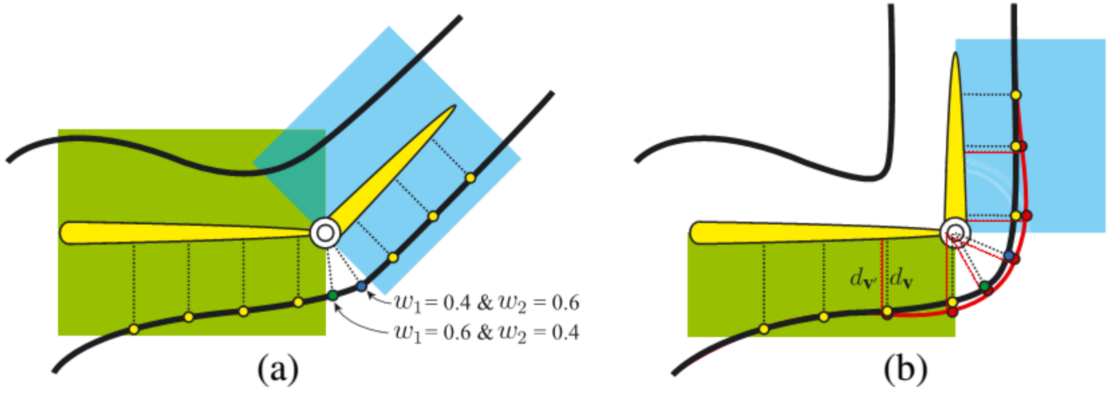
# DQS の欠点の克服



LBS DQS [Kavan12]

LBS DQS [Kavan12]

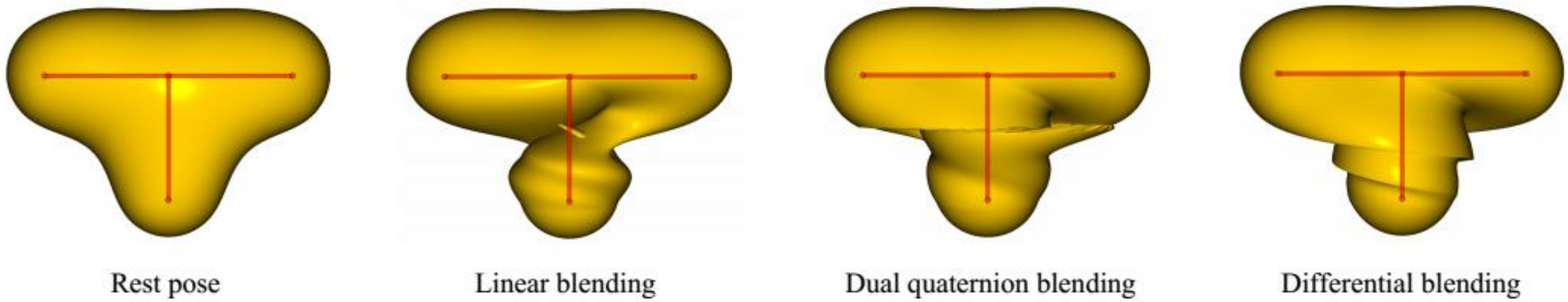
変換を bend と twist に分解し、別々に補間 [Kavan12]

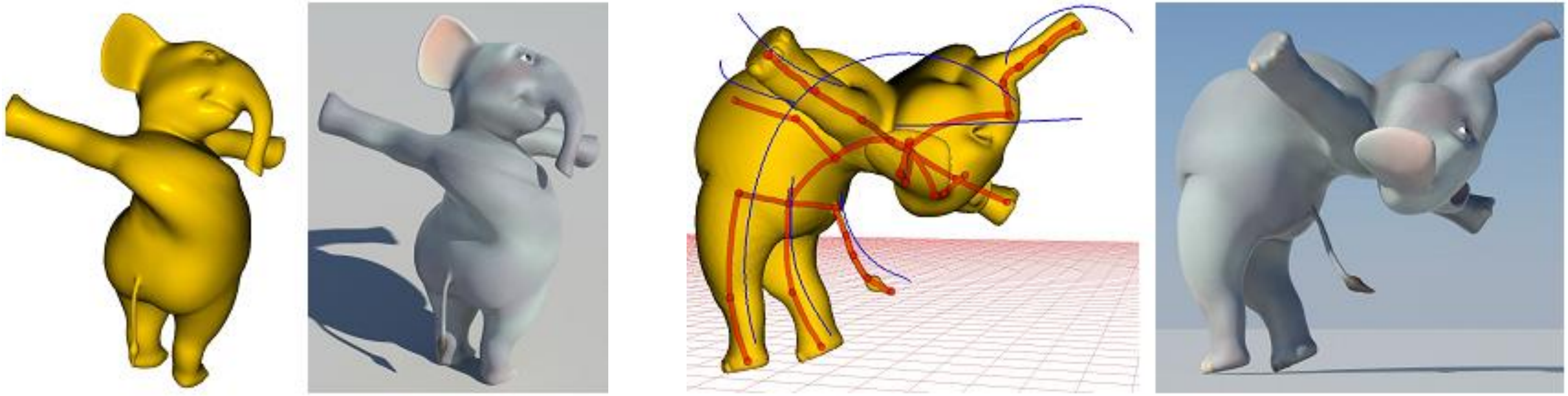



DQS で動かした後、法線方向にオフセット [Kim14]

Elasticity-Inspired Deformers for Character Articulation [Kavan SIGGRAPHAsia12]
Bulging-free dual quaternion skinning [Kim CASA14]

# DQS の欠点：捻りの回転量の制限

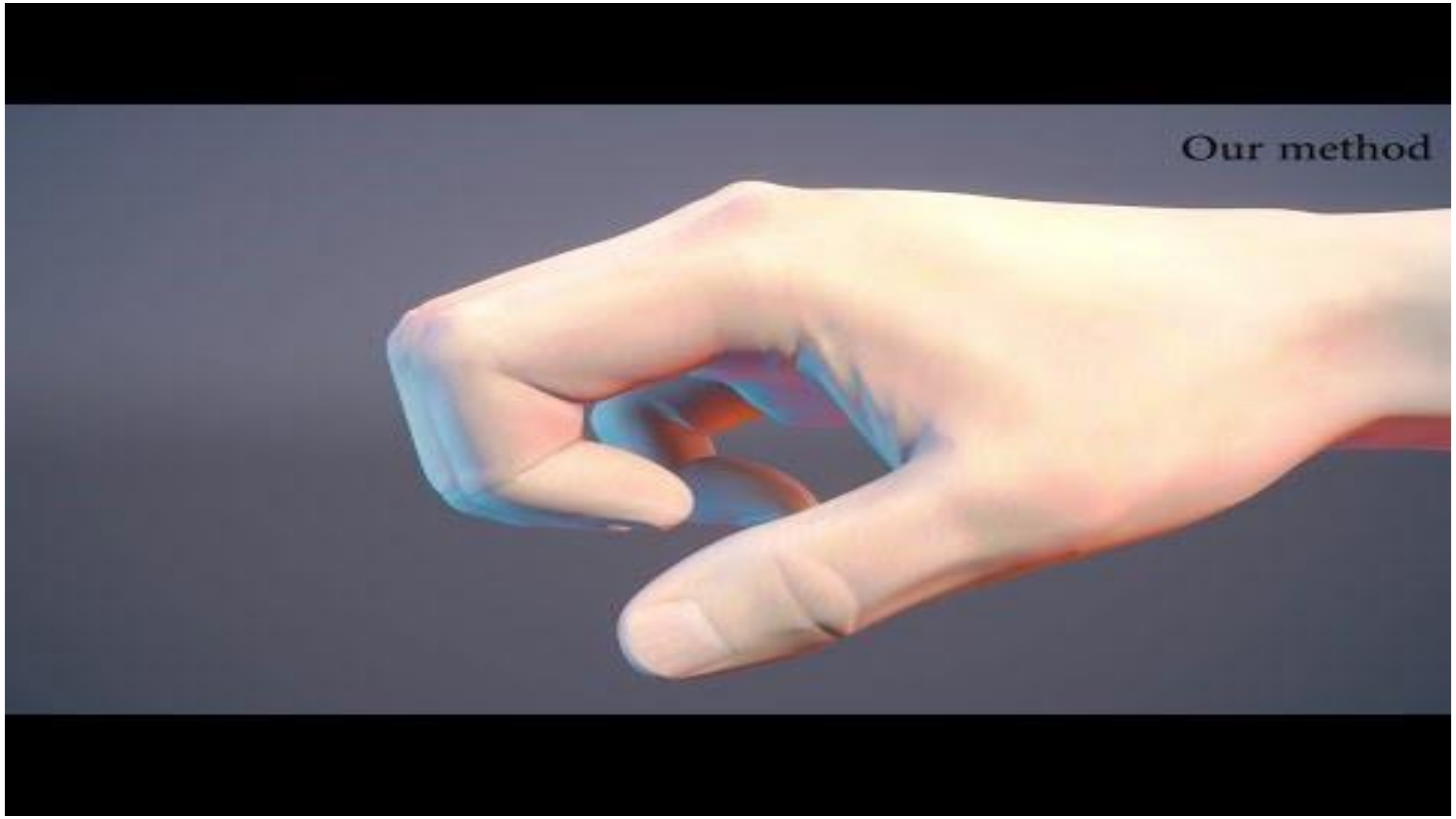


Differential Blending for Sketch-based Expressive Posing [Oztireli SCA13]

# 自己交差を回避するスキニング

- 陰関数の性質を活用

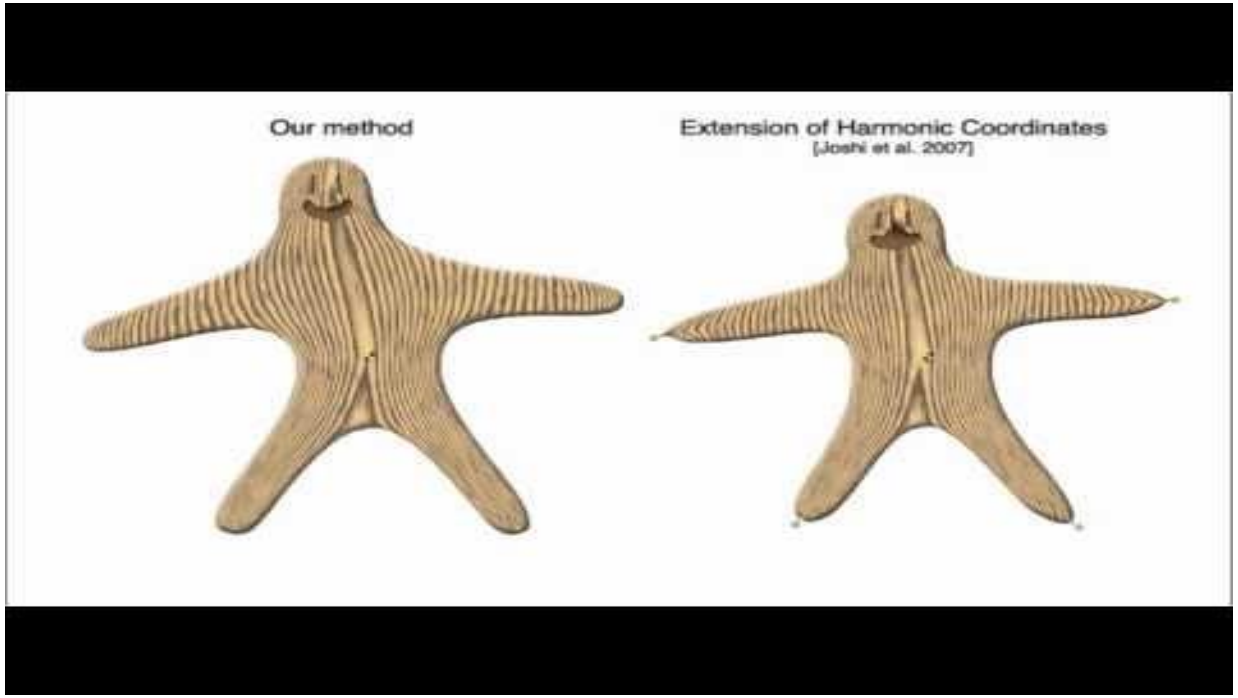



https://www.youtube.com/watch?v=RHySGIqEgyk

Implicit Skinning; Real-Time Skin Deformation with Contact Modeling [Vaillant SIGGRAPH13]

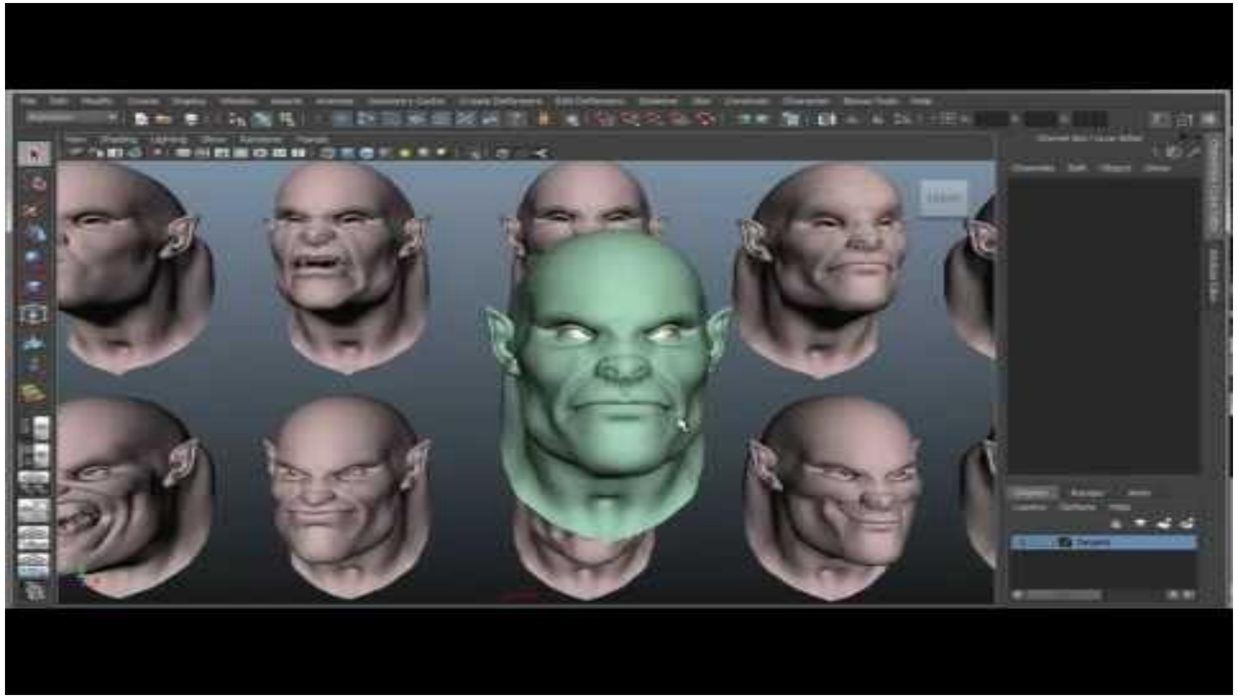
# スケルトン以外の変形インタフェース

点、ケージ、スケルトンの統合 [Jacobson 11]




https://www.youtube.com/watch?v=P9fqm8vgdB8

BlendShape



https://www.youtube.com/watch?v=BFPAIU8hwQ4

Bounded Biharmonic Weights for Real-Time Deformation [Jacobson SIGGRAPH11]

# 参考情報

- http://en.wikipedia.org/wiki/Motion_capture
- http://skinning.org/
- http://mukai-lab.org/category/library/legacy
- CG Gems JP 2012 Chapter 8 インバースキネマティクス