コンピュータグラフィクス論

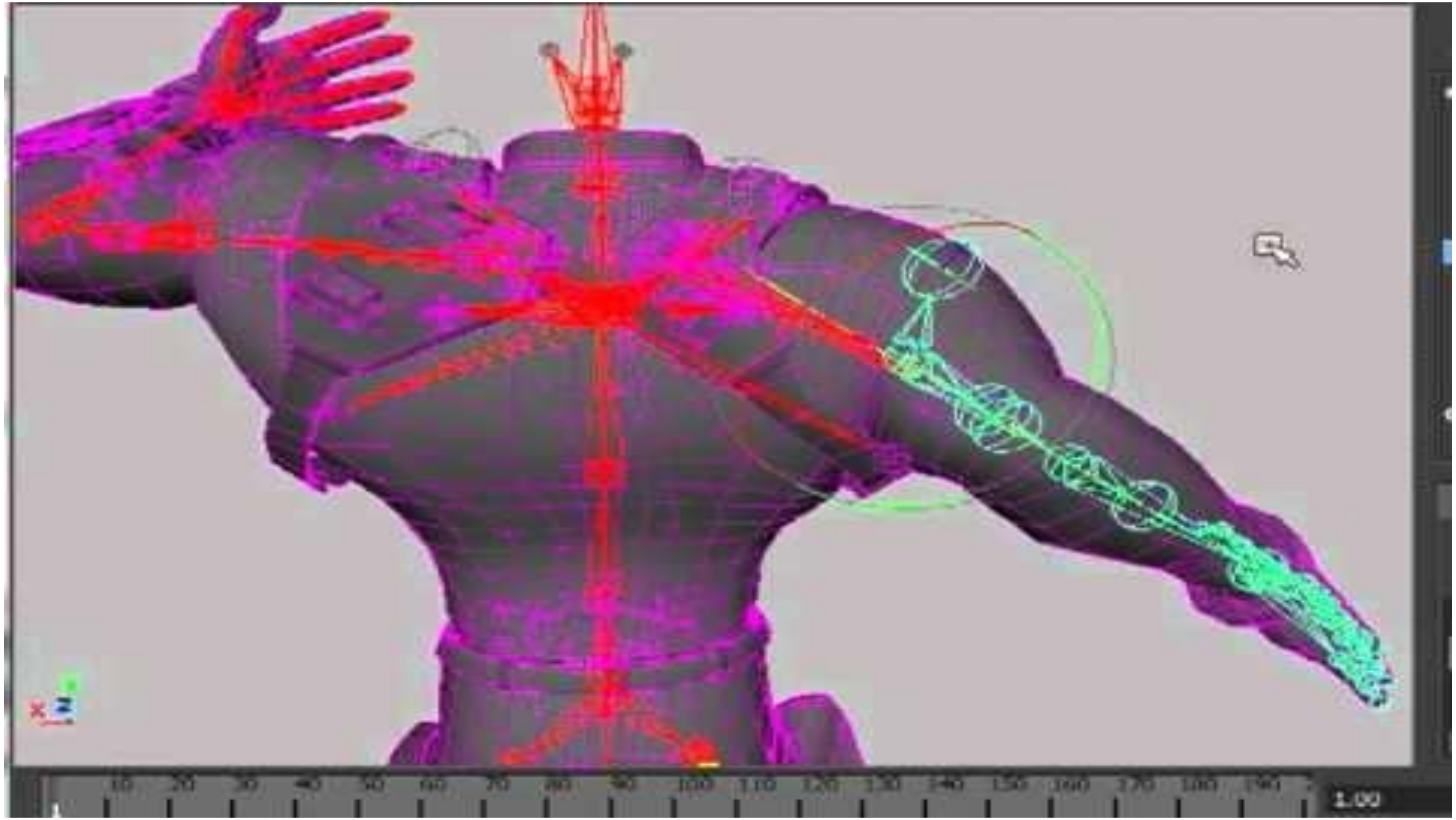
– アニメーション(1) –

2015年5月14日

高山 健志

スケルトンによるアニメーション

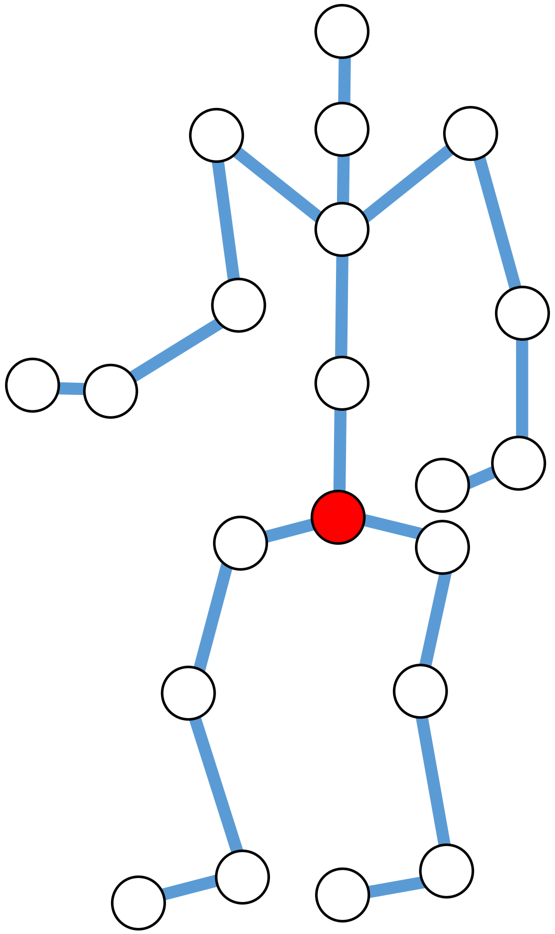
- 単純な仕組み
- 直感的な挙動
- 低い計算コスト



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

スケルトンによる姿勢の表現

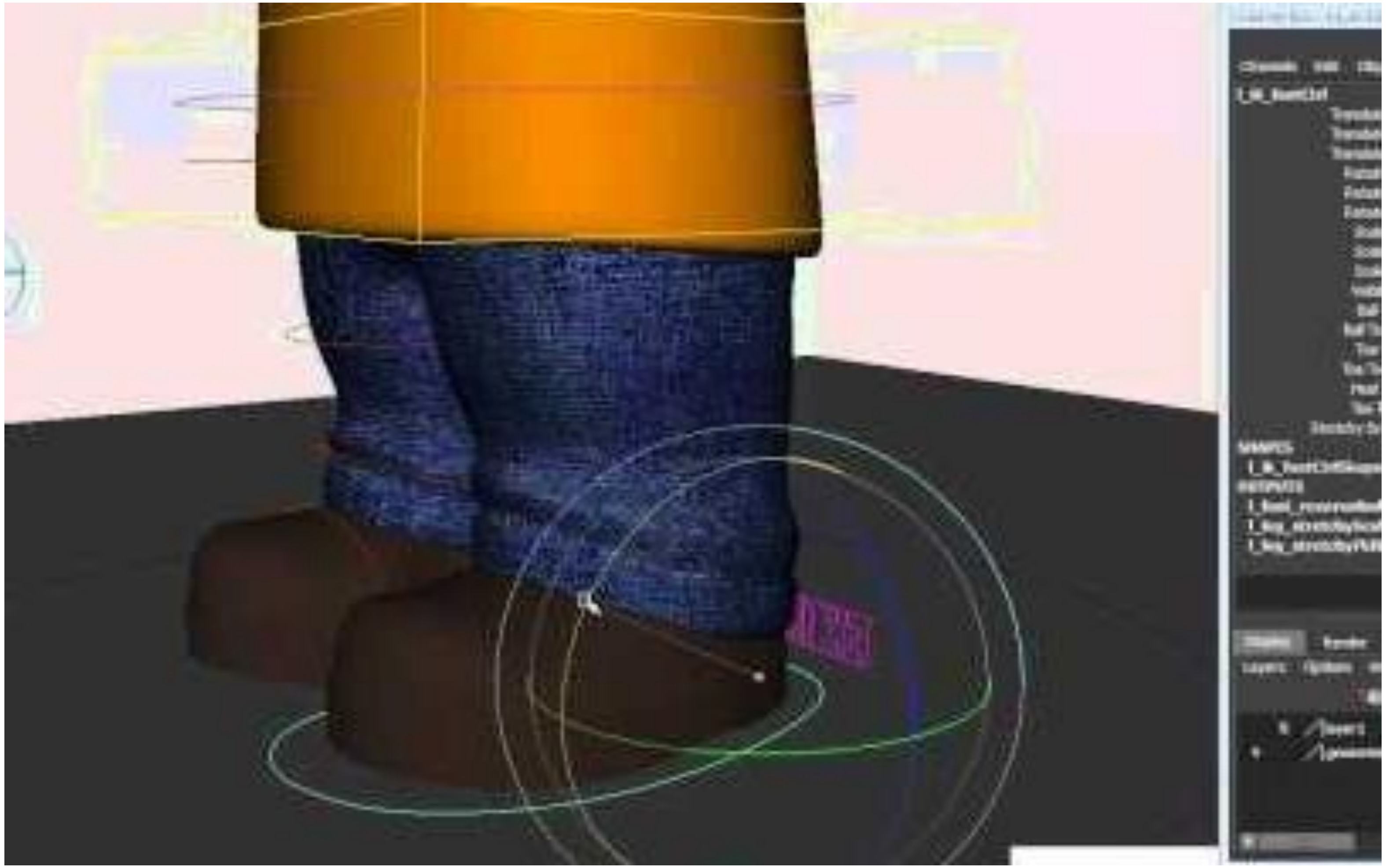
- ボーンと関節から成る木構造
- ボーンは親関節を基準とした相対的な回転角を保持
- 各関節の回転角によって全体の姿勢を決定
  (**F**orward **K**inematics)
- ロボティクス分野と深く関連



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

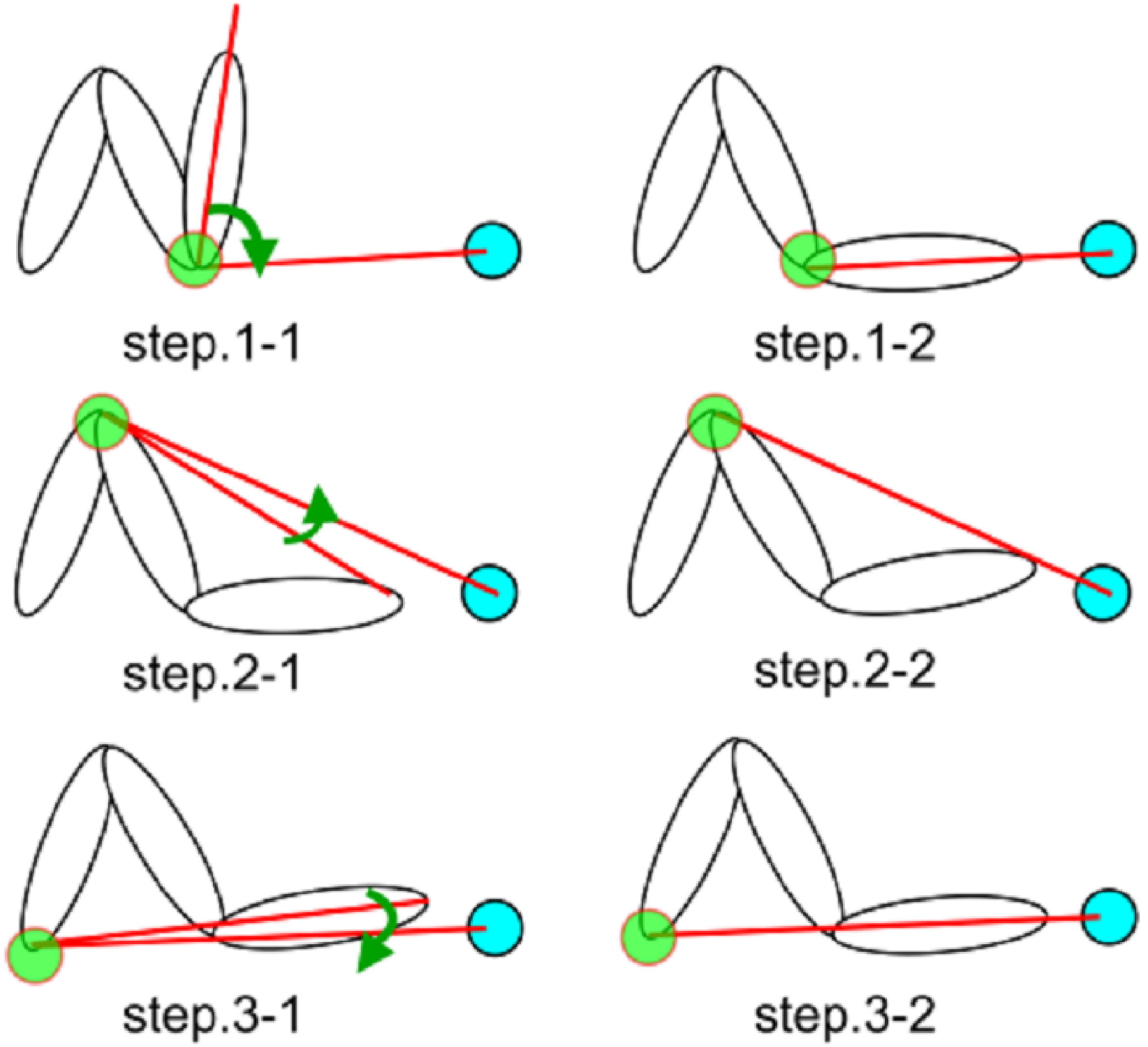
- IK で手早く姿勢を作り、FK で微調整



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

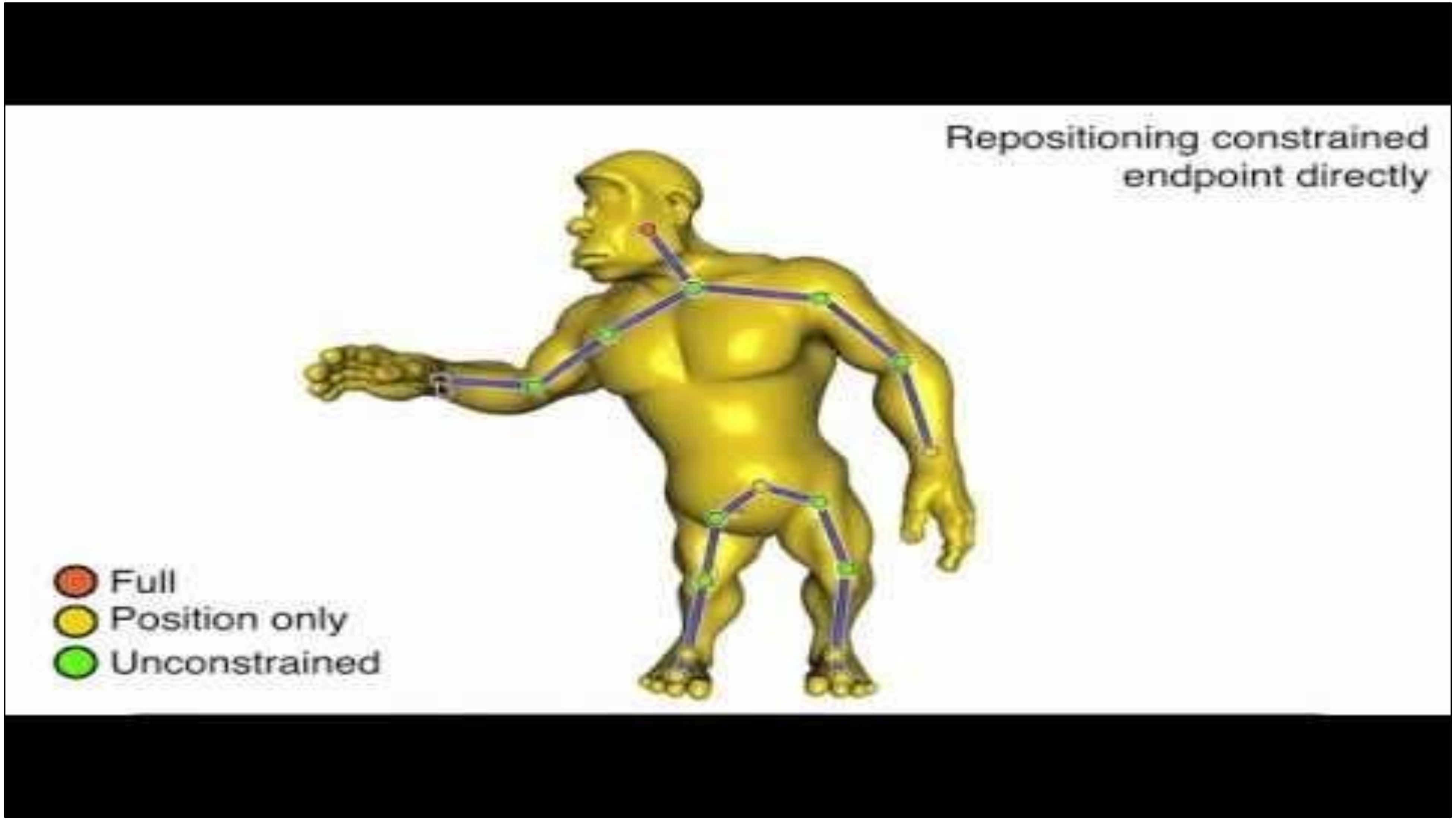
IK の一解法：Cyclic Coordinate Descent

- 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 ➔ 必須課題 (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



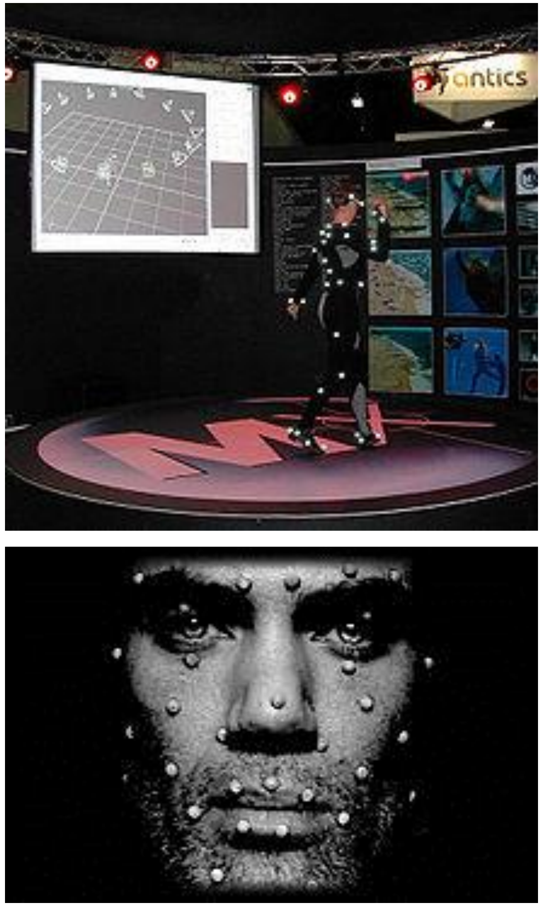
Fast Automatic Skinning Transformations [Jacobson SIGGRAPH12]

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

モーションデータの取得方法

光学式モーションキャプチャ

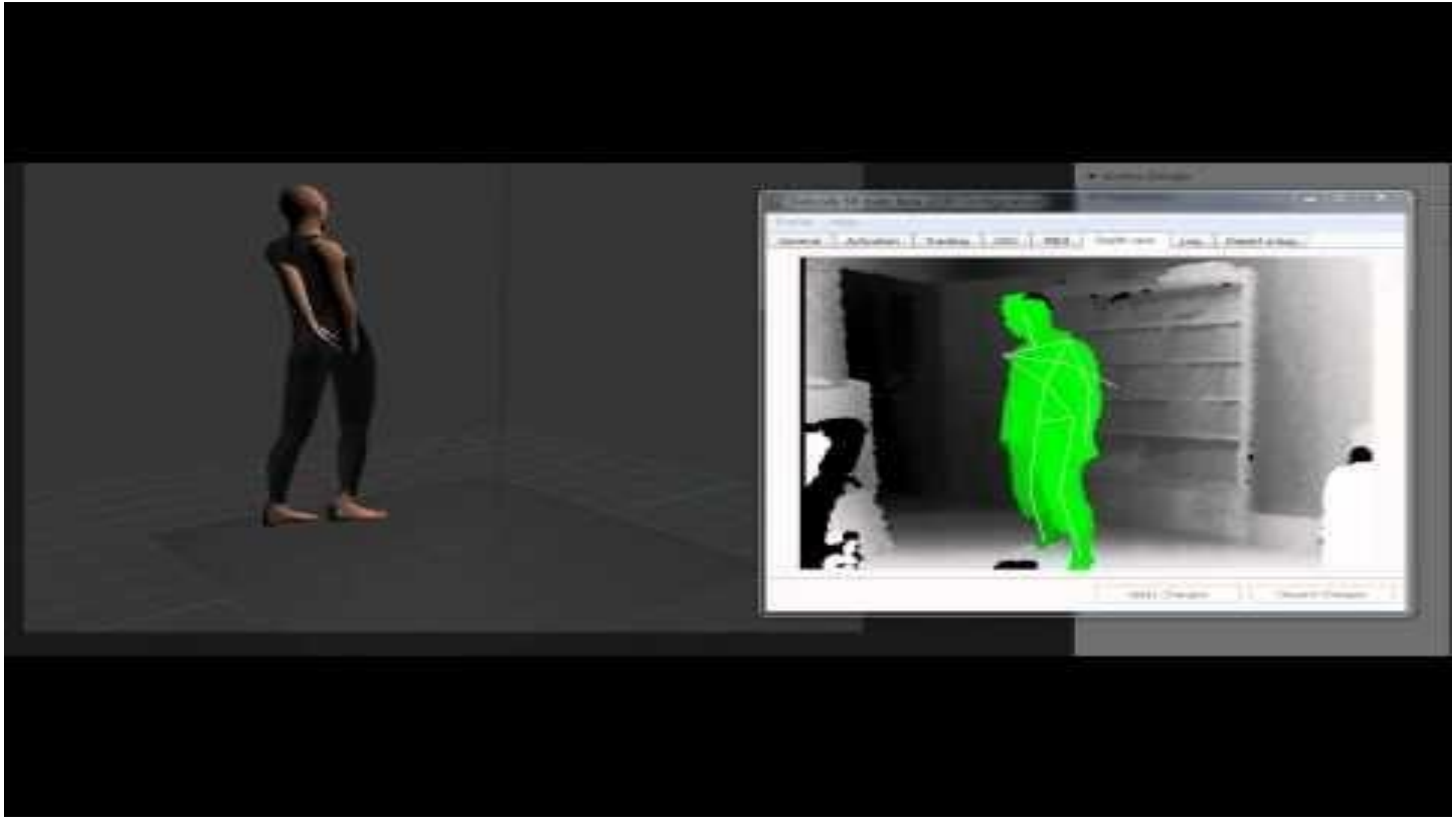
- 役者にマーカーを取り付け、多数 (~48) のカメラで撮影



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



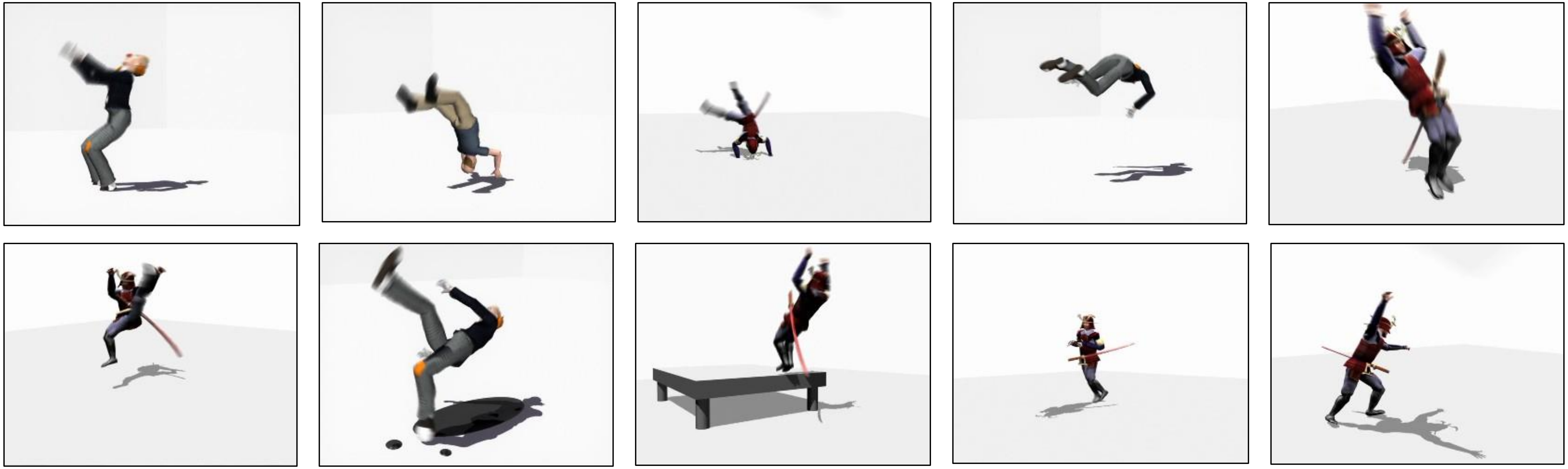
https://www.youtube.com/watch?v=qC-fdgPJhQ8

屋外で使えるモーキャプ

Motion Capture from Body-Mounted Cameras [Shiratori SIGGRAPH11]

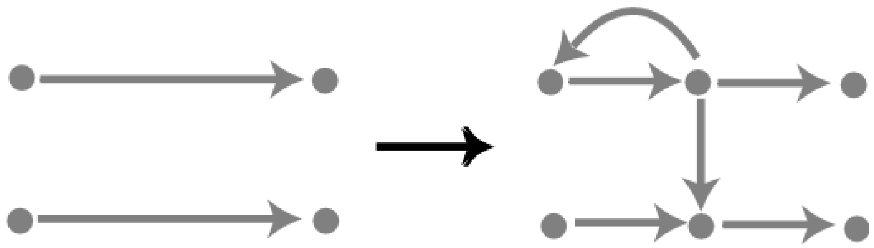
モーションデータベース

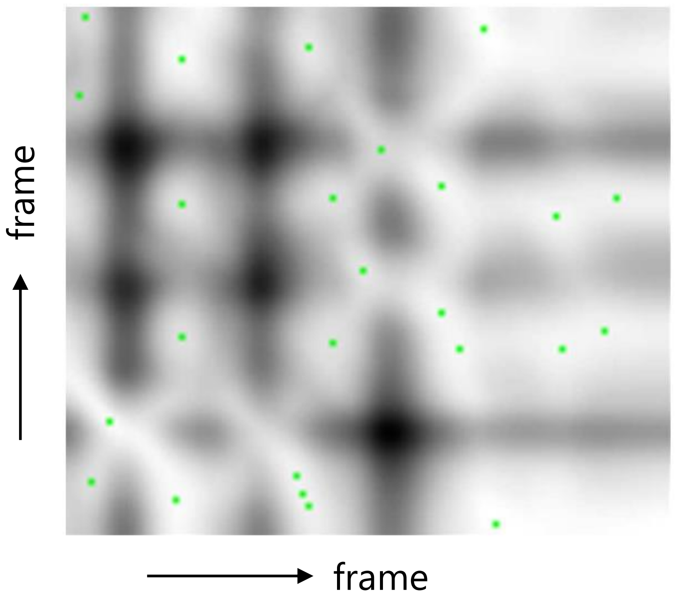
- http://mocap.cs.cmu.edu/
- 6 カテゴリ、合計 2605個
- 研究促進のために無償公開 (補間、連結、解析、検索、etc)



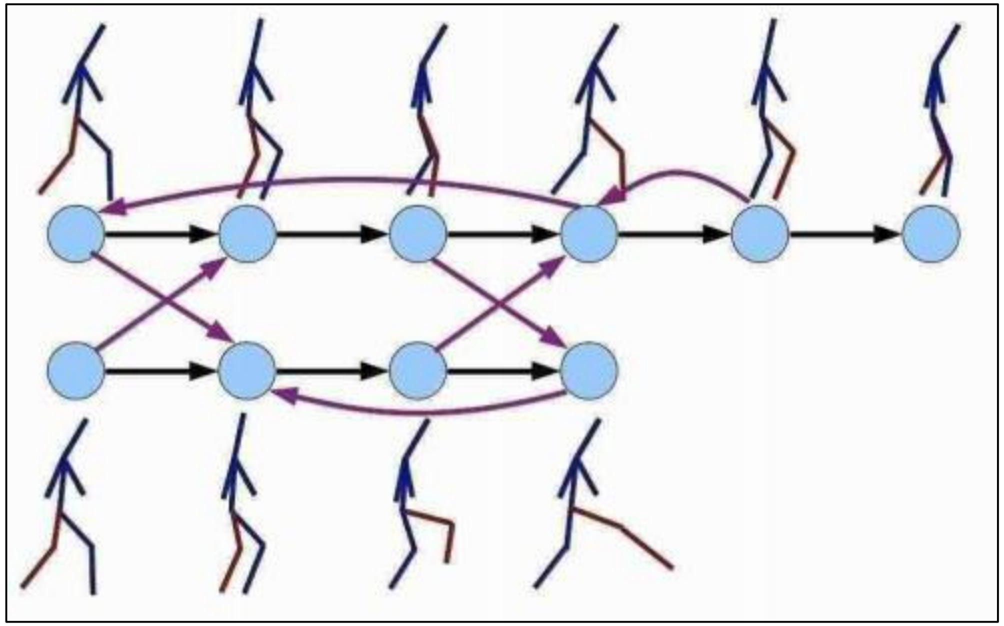
モーションの連結

- 二つのフレームで姿勢が似ていれば、遷移を許す





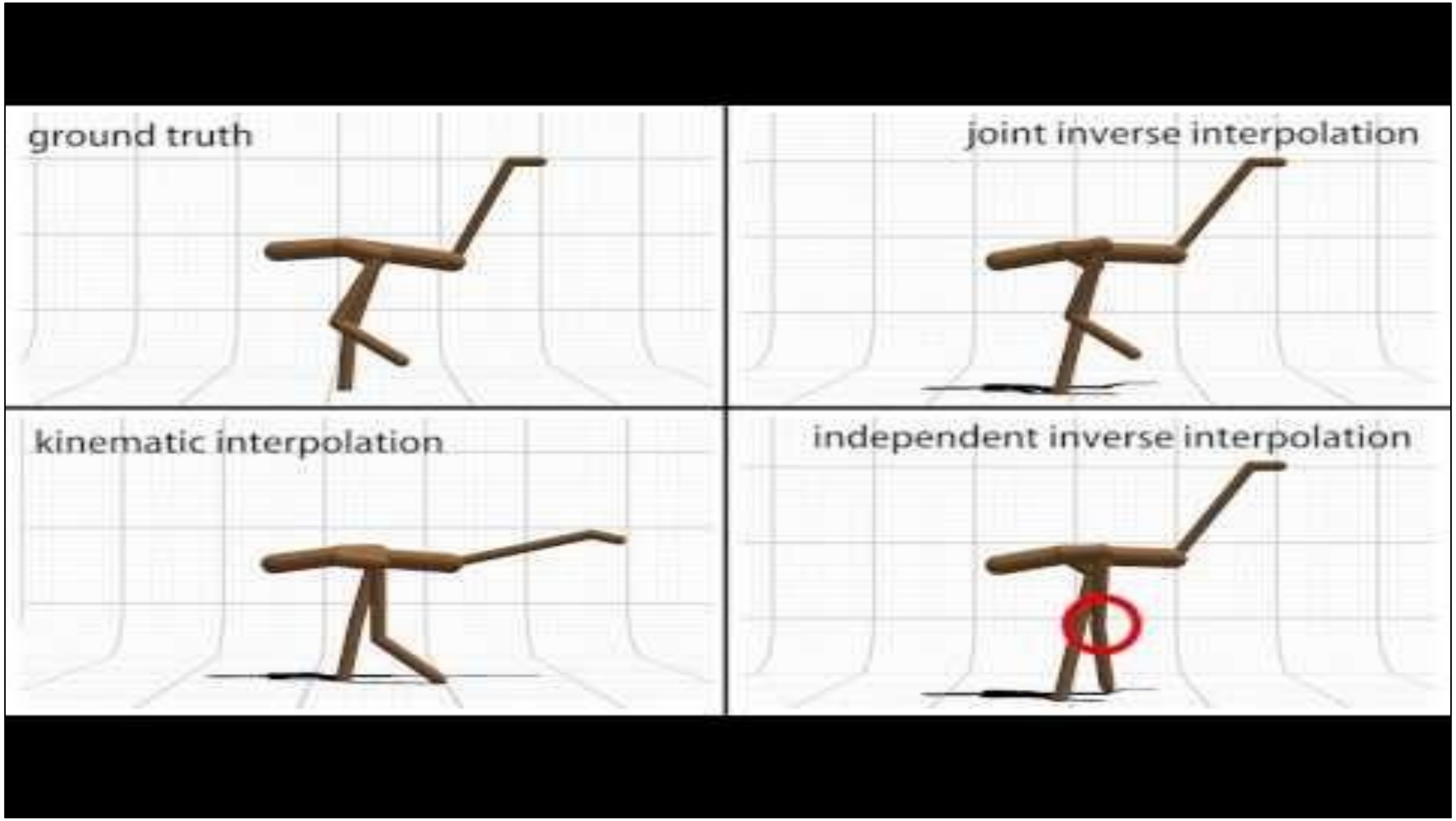
フレーム間の姿勢の類似度



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

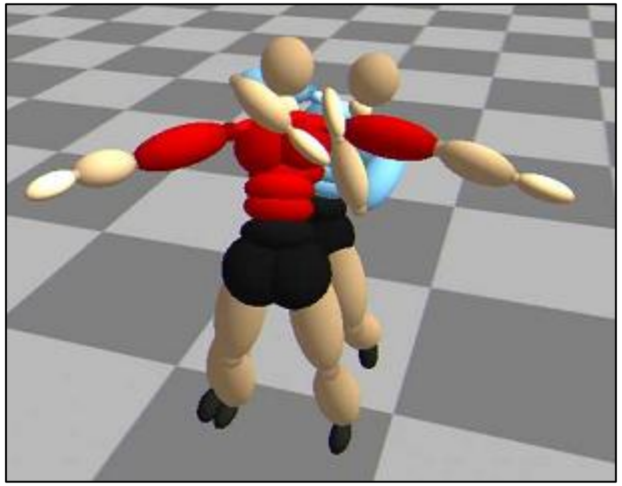
- モーキャプできない対象に使える
- 体型に合った自然な動作を生成できる
- 動的に変化する環境に適応できる



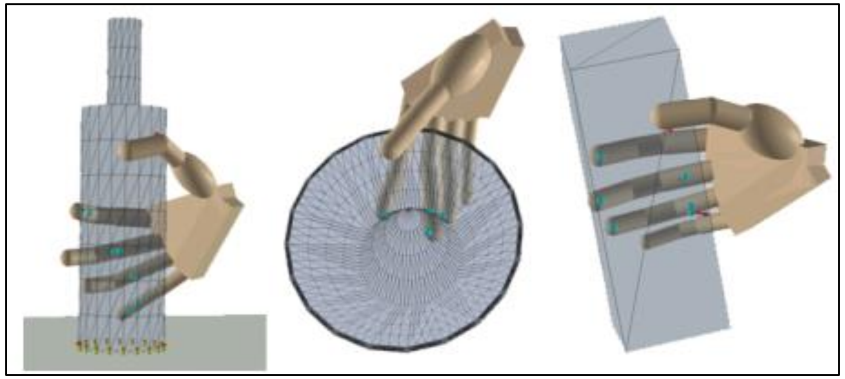
https://www.youtube.com/watch?v=KF_a1c7zytw

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

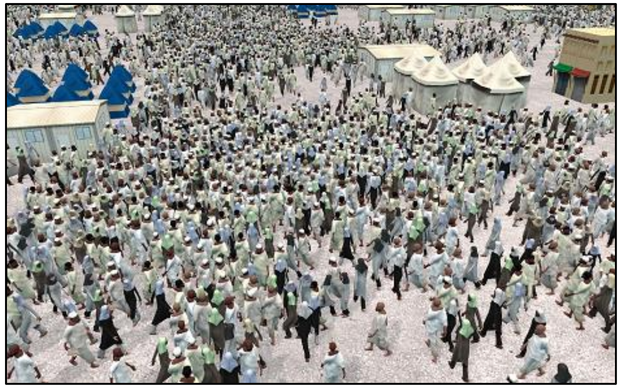
キャラクタの動きに関する様々なトピック



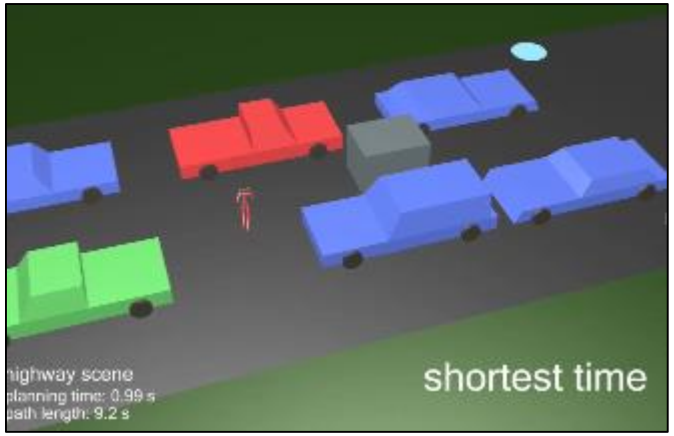
複数キャラクタの
インタラクション



物体をつかむ動作



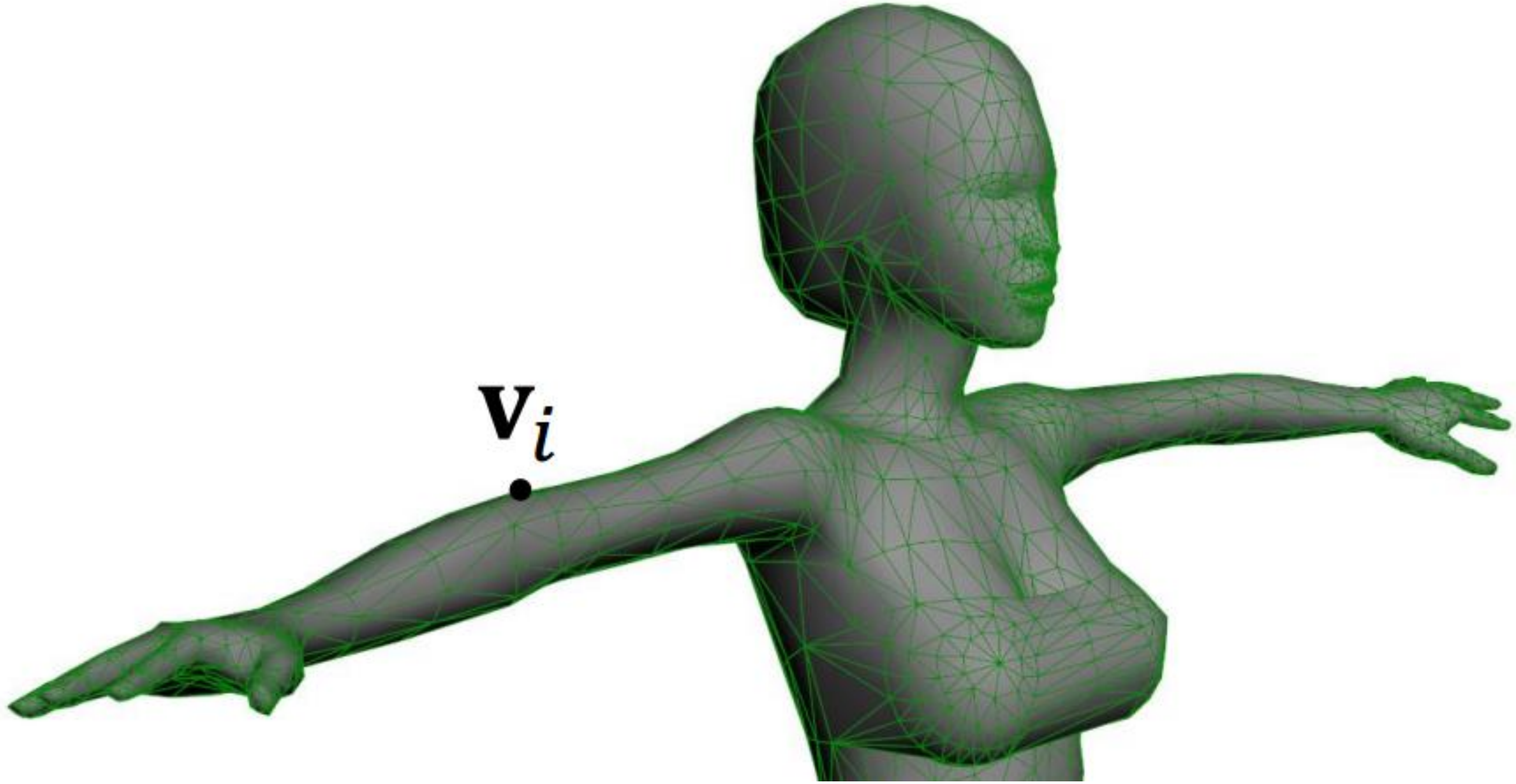
群衆シミュレーション

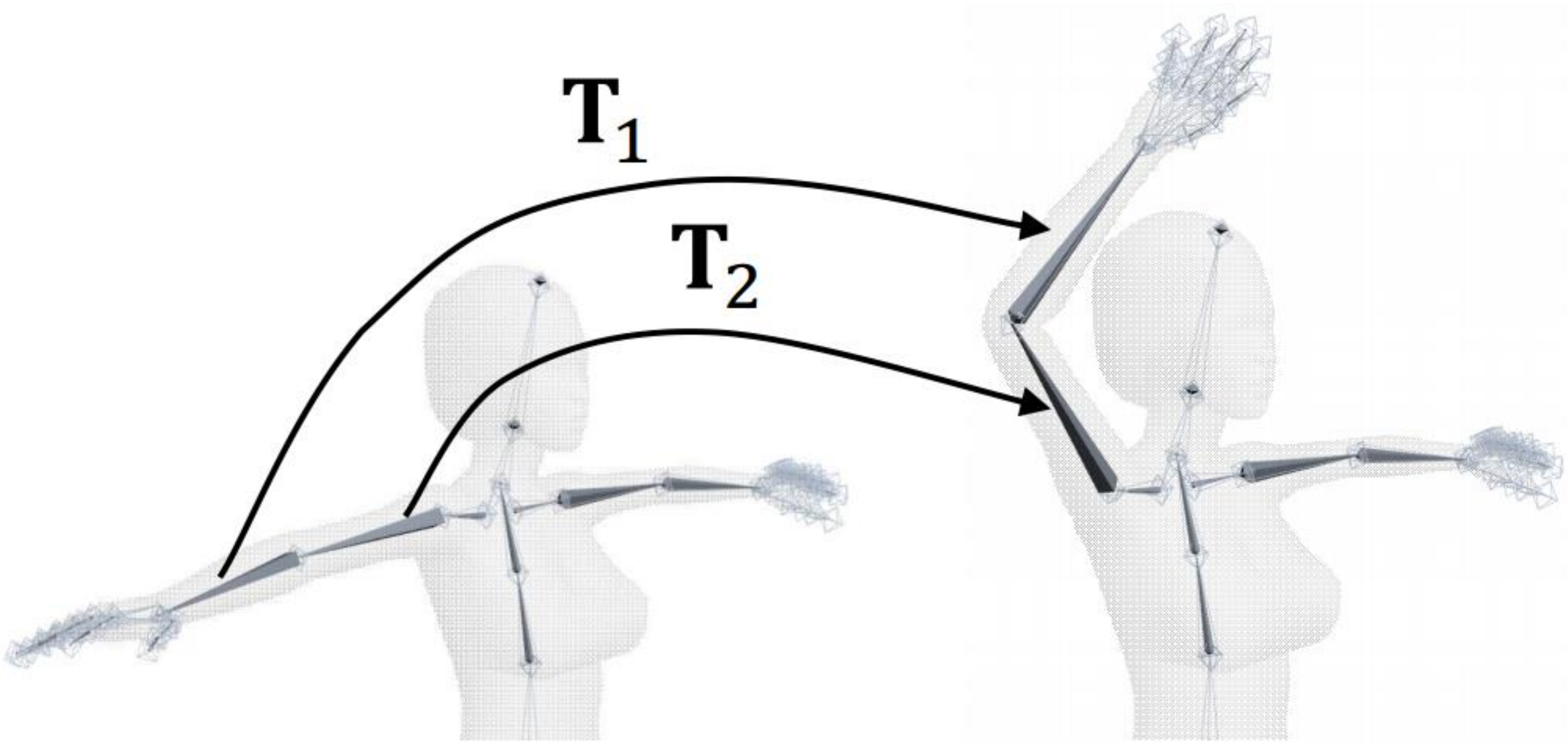


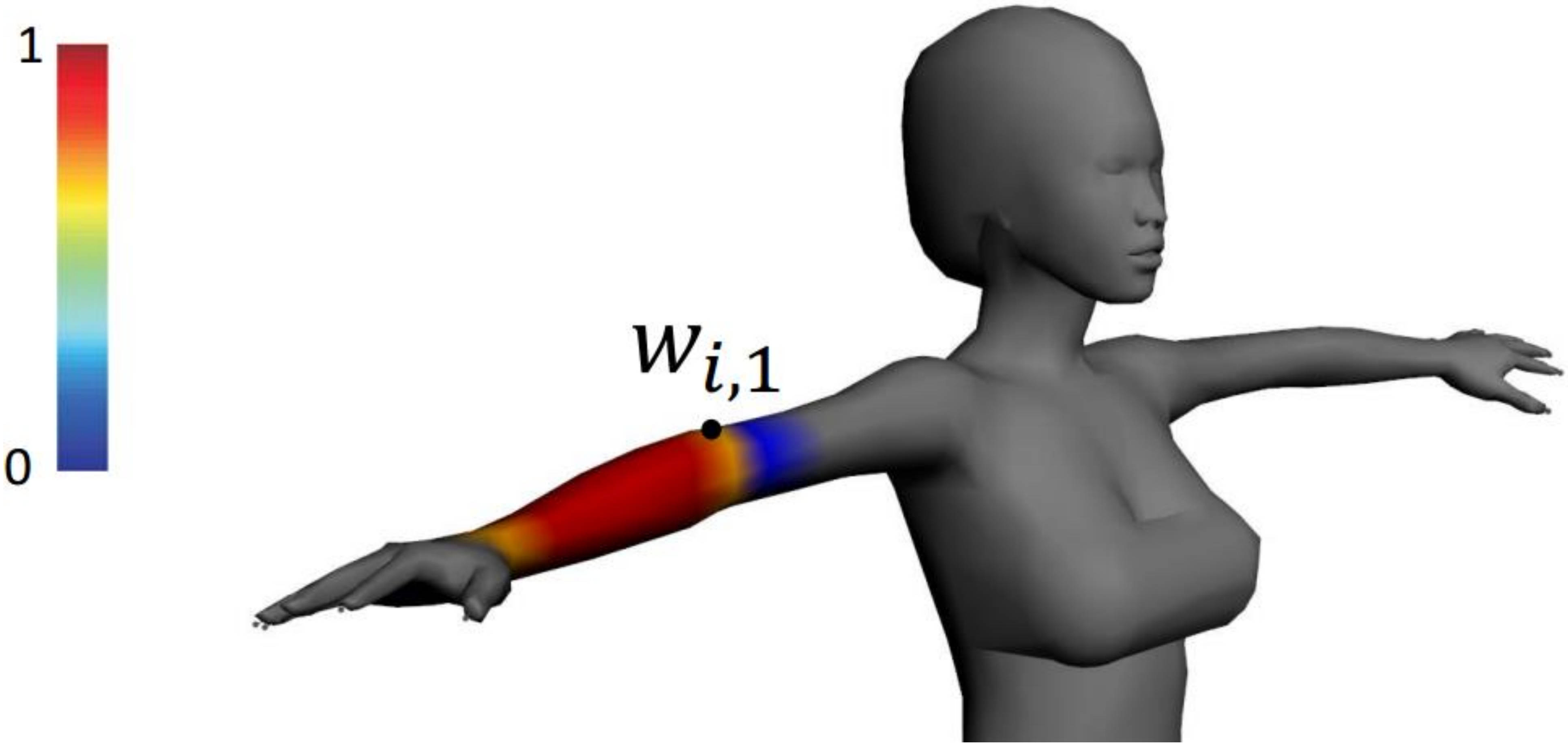
Path planning

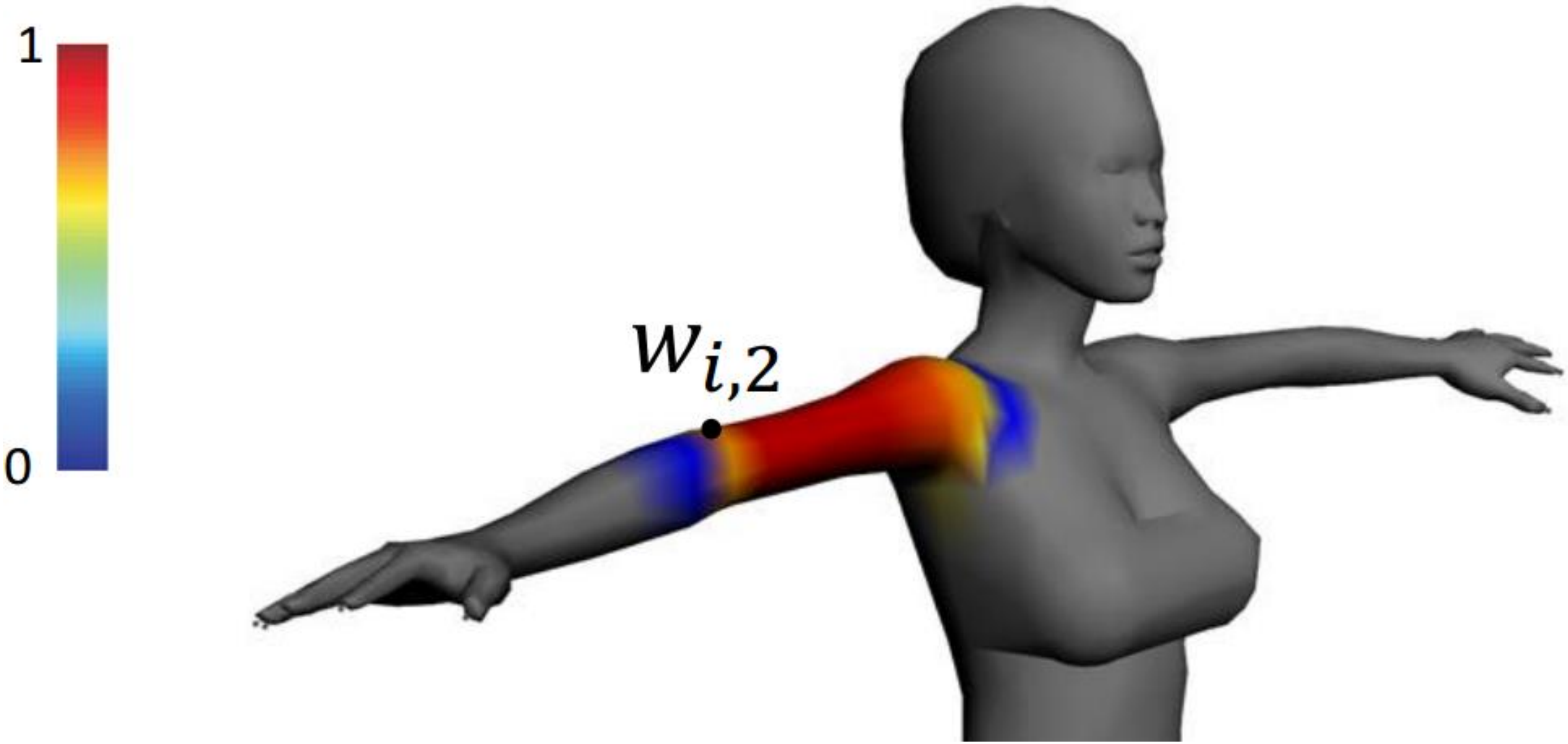
Character motion synthesis by topology coordinates [Ho EG09]
Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation [Narain SIGGRAPHAsia09]
Synthesis of Detailed Hand Manipulations Using Contact Sampling [Ye SIGGRAPH12]
Space-Time Planning with Parameterized Locomotion Controllers.[Levine TOG11]

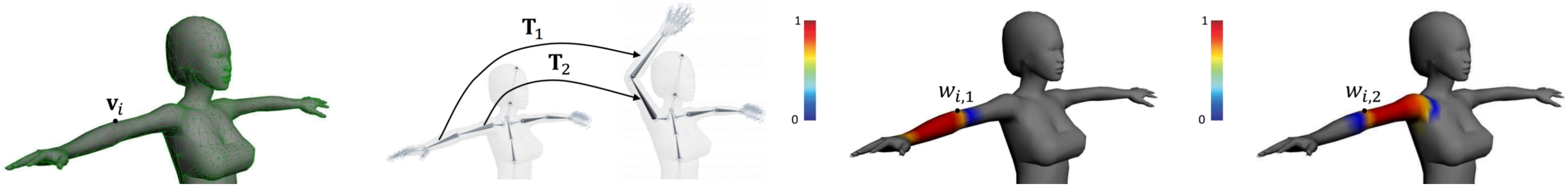
スキニング


$\mathbf{v}_i$


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


1
0
$w_{i,1}$


1
0
$w_{i,2}$



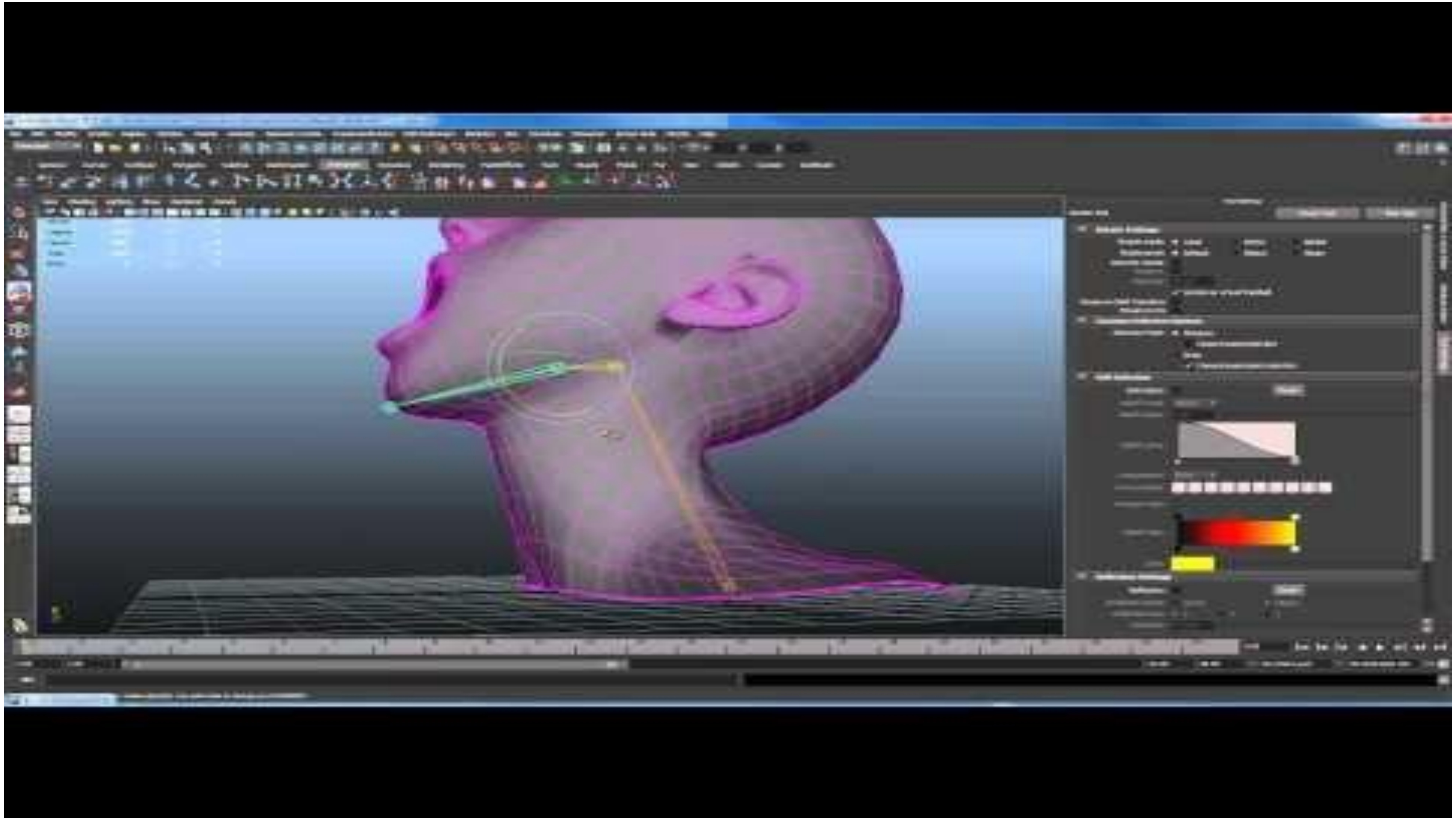
$$\mathbf{v}_i' = \mathrm{blend}\Big(\big\langle w_{i,1}, \mathbf{T}_1 \big\rangle, \big\langle w_{i,2}, \mathbf{T}_2 \big\rangle, \dots\Big)(\mathbf{v}_i)$$

- 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



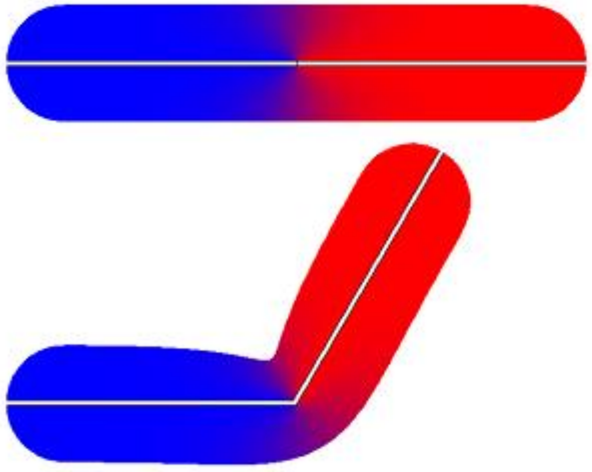
https://www.youtube.com/watch?v=TACB6bX8SN0

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 $\int_\Omega \left\|\nabla w_j\right\|^2 dA$ 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 $\int_\Omega \left(\Delta w_j\right)^2 dA$ を最小化 [Jacobson 11]
  - 不等式制約 $0 \leq w_j \leq 1$ 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]

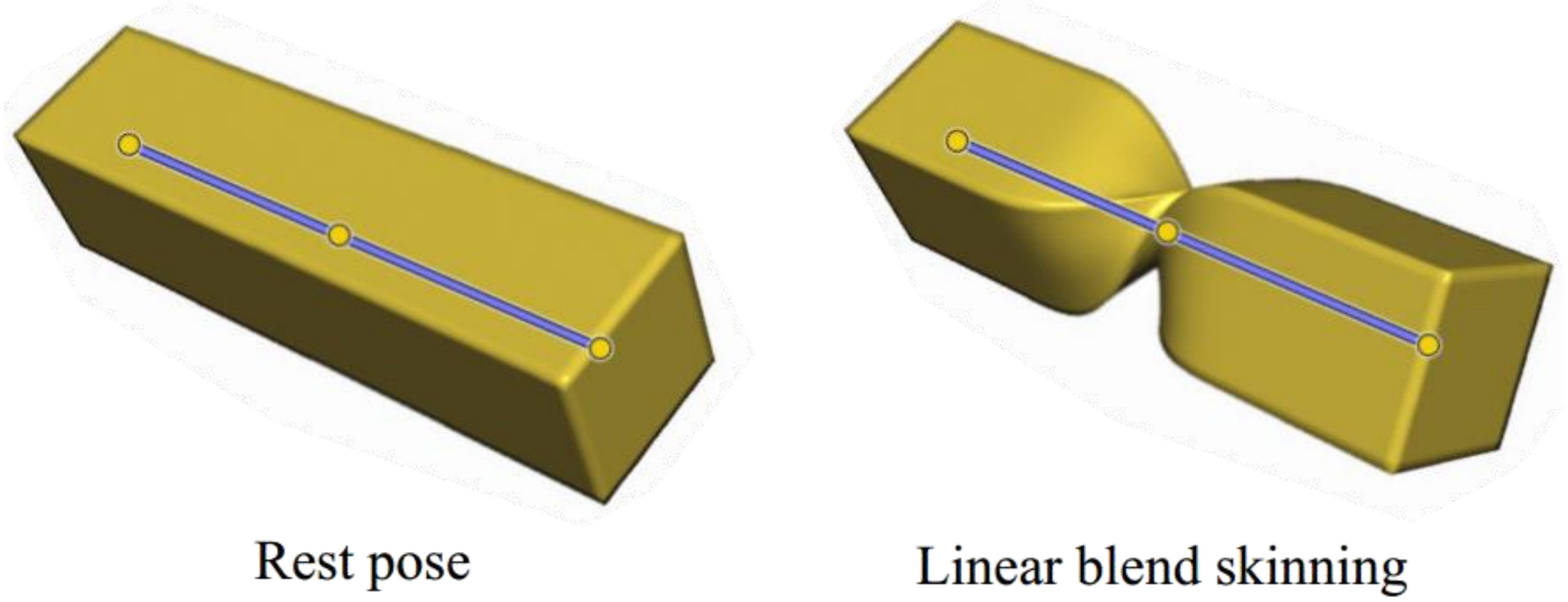
変換の混合手法：**L**inear **B**lend **S**kinning

- 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



- 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

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

- Dual quaternion の定義
  - $\varepsilon^2 = 0$ を満たす dual 単位 ε を導入 (cf. 虚数単位 i)
  - Dual quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ を、二つの quaternion $\mathbf{q}_r$ と $\mathbf{q}_d$ によって
  $$\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_r + \varepsilon \mathbf{q}_d$$
  と定義する
  - 普通の quaternion の演算規則から、dual quaternion の演算規則が導かれる

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

Dual quaternion の演算規則

- Dual 共役　$\overline{\hat{\mathbf{q}}} = \overline{\mathbf{q}_r + \varepsilon \mathbf{q}_d} = \mathbf{q}_r - \varepsilon \mathbf{q}_d$
- 複素共役　$\hat{\mathbf{q}}^* = \mathbf{q}_r^* + \varepsilon \mathbf{q}_d^*$
- ノルム　$\|\hat{\mathbf{q}}\| = \sqrt{\hat{\mathbf{q}}^* \hat{\mathbf{q}}} = \|\mathbf{q}_r\| + \varepsilon \frac{\mathbf{q}_r^* \mathbf{q}_d}{\|\mathbf{q}_r\|}$　　単位 dual quaternion：$\|\hat{\mathbf{q}}\| = 1$
- 逆元　$\hat{\mathbf{q}}^{-1} = \frac{\hat{\mathbf{q}}^*}{\|\hat{\mathbf{q}}\|^2}$

- 3D 座標 $(v_\mathrm{x}, v_\mathrm{y}, v_\mathrm{z})$ の剛体変換
  - 3D 座標を表す dual quaternion：$\hat{\mathbf{v}} = 1 + \varepsilon(i v_\mathrm{x} + j v_\mathrm{y} + k v_\mathrm{z})$
  - 剛体変換後の3D座標：

$$\widehat{\mathbf{v}'} = \hat{\mathbf{q}} \hat{\mathbf{v}} \overline{\hat{\mathbf{q}}^*}$$

  - $\mathbf{q}_r$ が回転、$\mathbf{q}_d$ が平行移動を表す

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

単位 dual quaternion と 3D 剛体変換の関係

- 単位 dual quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ は、dual 数 $\hat{\theta} = \theta_r + \varepsilon\theta_d$ と、実部を含まない単位 dual quaternion $\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{s}_r + \varepsilon\mathbf{s}_d$ によって以下のように書ける：

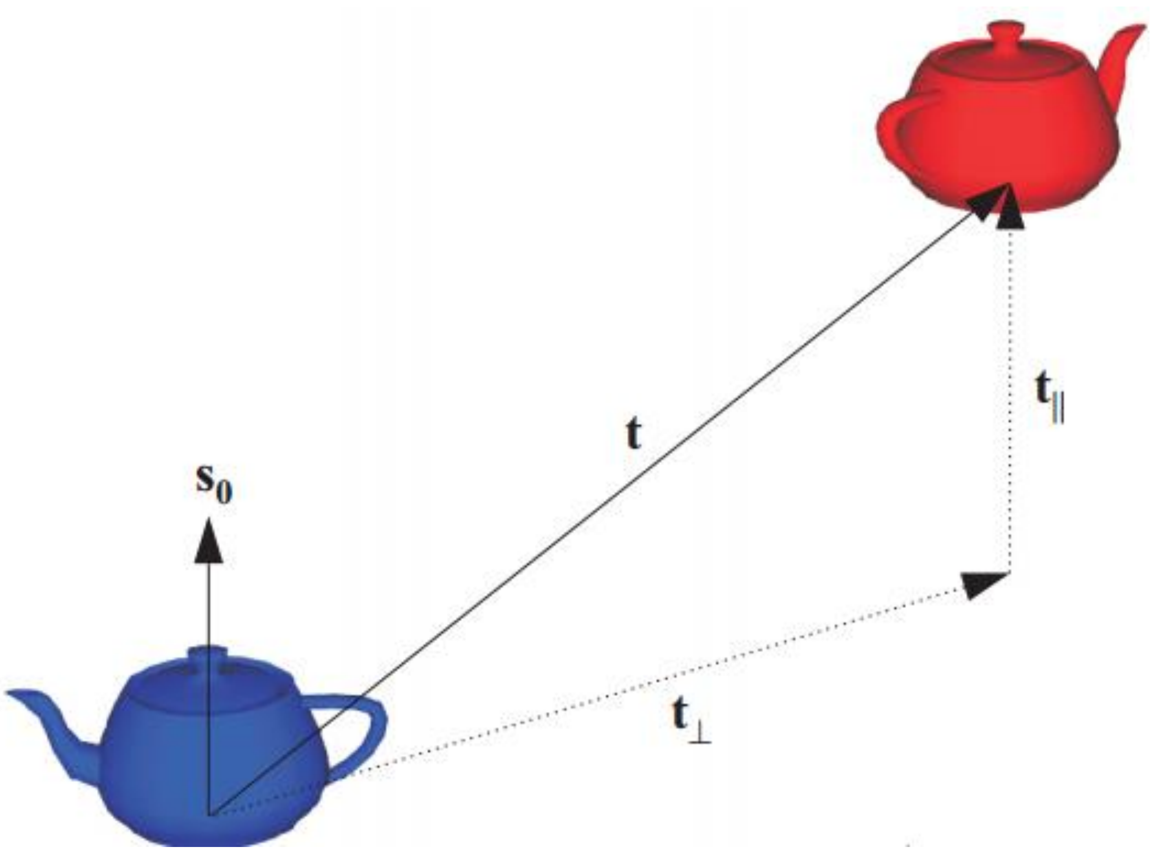
$$\hat{\mathbf{q}} = \cos\frac{\hat{\theta}}{2} + \hat{\mathbf{s}}\sin\frac{\hat{\theta}}{2}$$

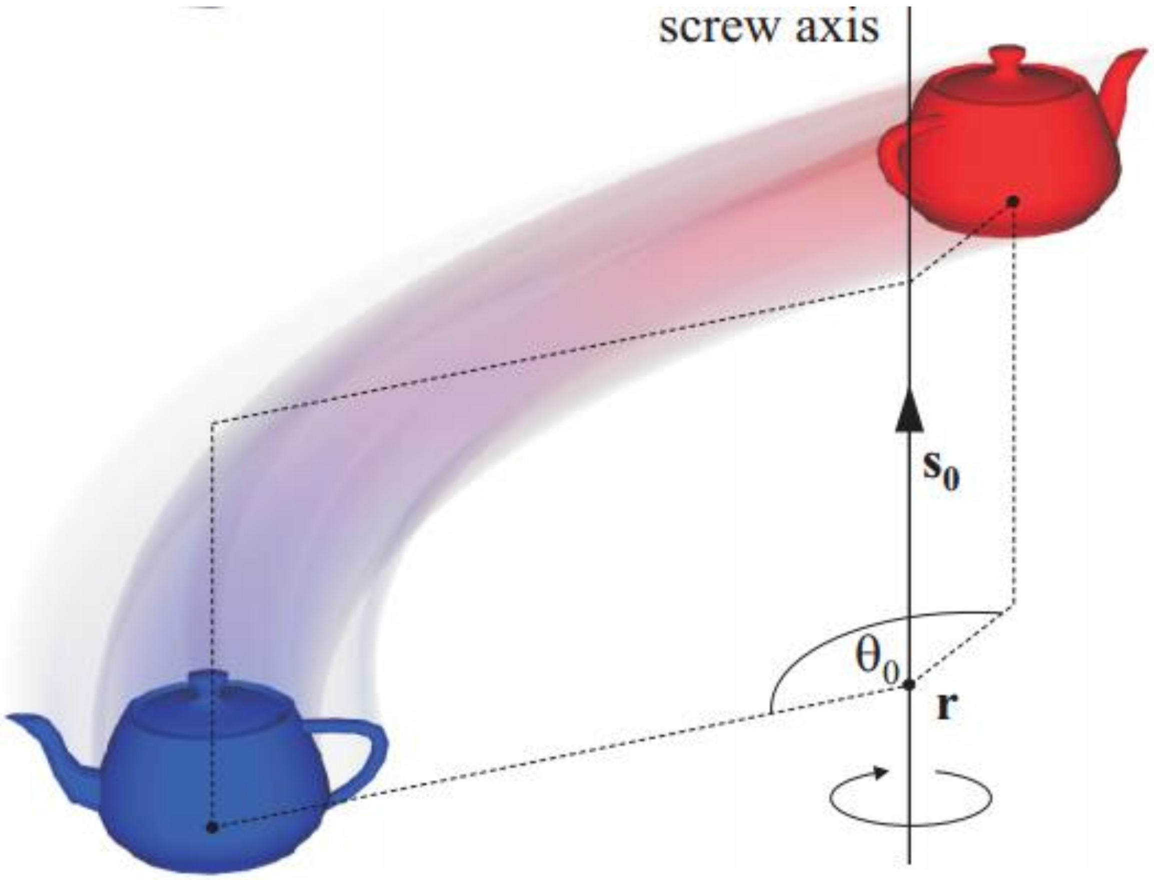
- 幾何的な意味：
  - $\mathbf{s}_r$ ：回転軸方向
  - θ_r ：回転量
  - θ_d ：回転軸方向の平行移動量
  - $\mathbf{s}_d$ ：回転軸が $\mathbf{r}$ を通るとき、$\mathbf{s}_d = \mathbf{r} \times \mathbf{s}_r$ を満たす

- 剛体運動は “screw motion” で一意に記述できる

Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

単位 dual quaternion と 3D 剛体変換の関係



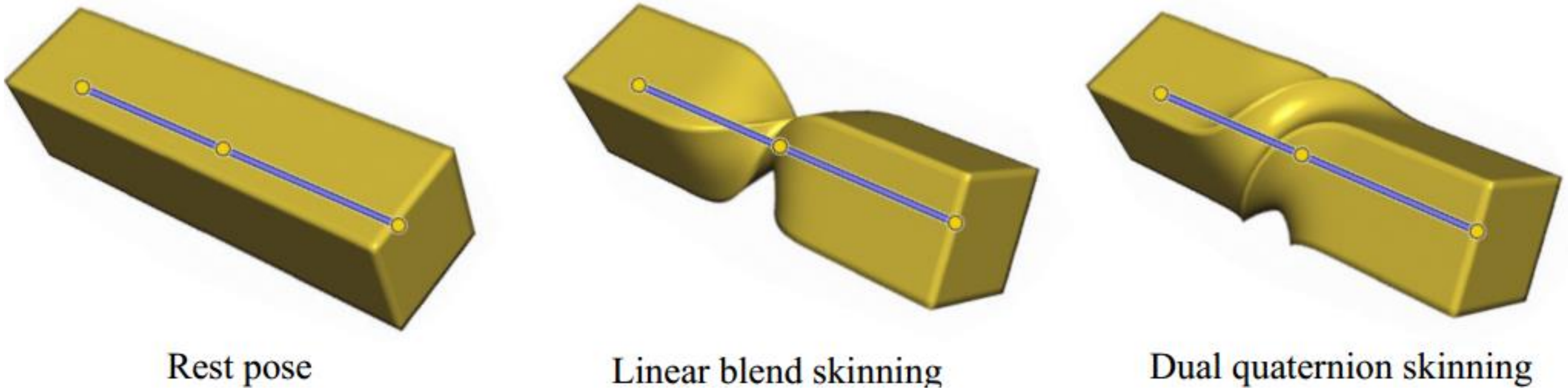


Geometric Skinning with Approximate Dual Quaternion Blending [Kavan TOG08]

Dual quaternion による剛体変換のブレンド

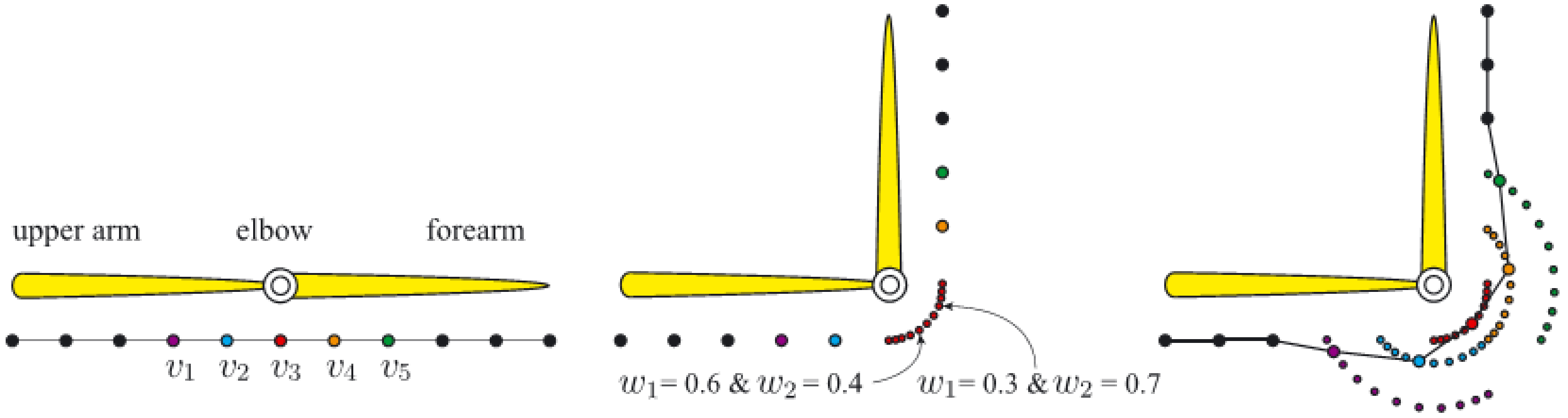
$$\mathrm{blend}(\langle w_1, \hat{\mathbf{q}}_1\rangle, \langle w_2, \hat{\mathbf{q}}_2\rangle, \dots) = \sum_i \frac{w_i \hat{\mathbf{q}}_i}{\| w_i \hat{\mathbf{q}}_i \|}$$

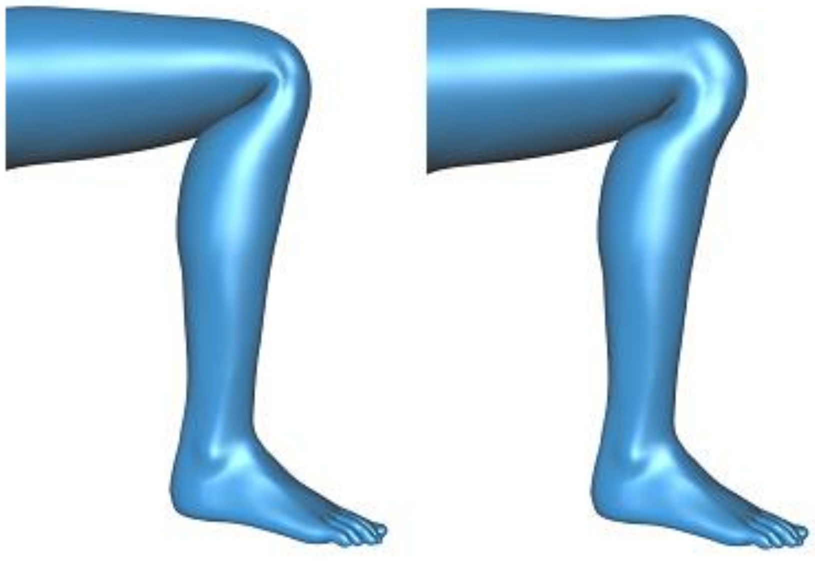
- Quaternion による回転と同様
- LBS と入出力が全く同一、計算コスト低い ➔ 現場で導入しやすい



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

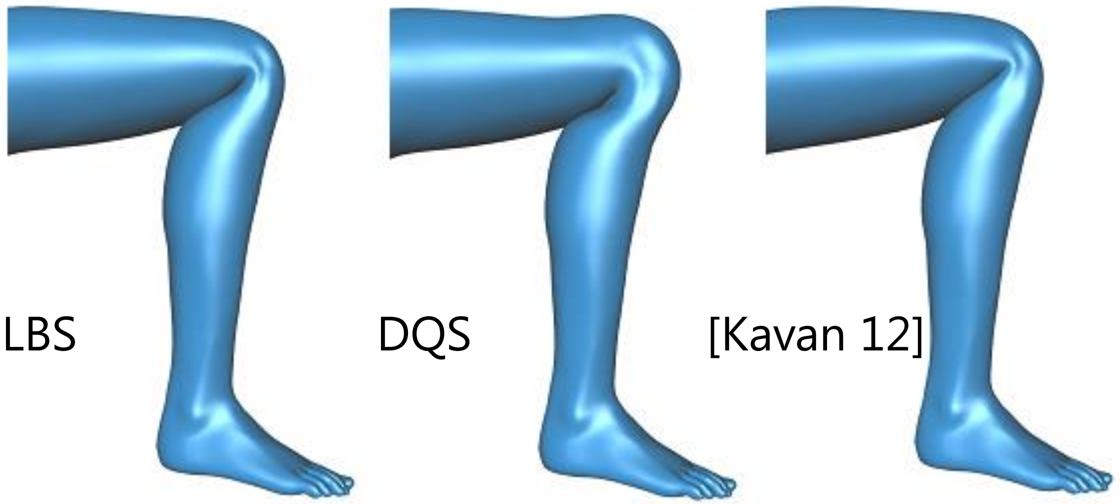




LBS DQS

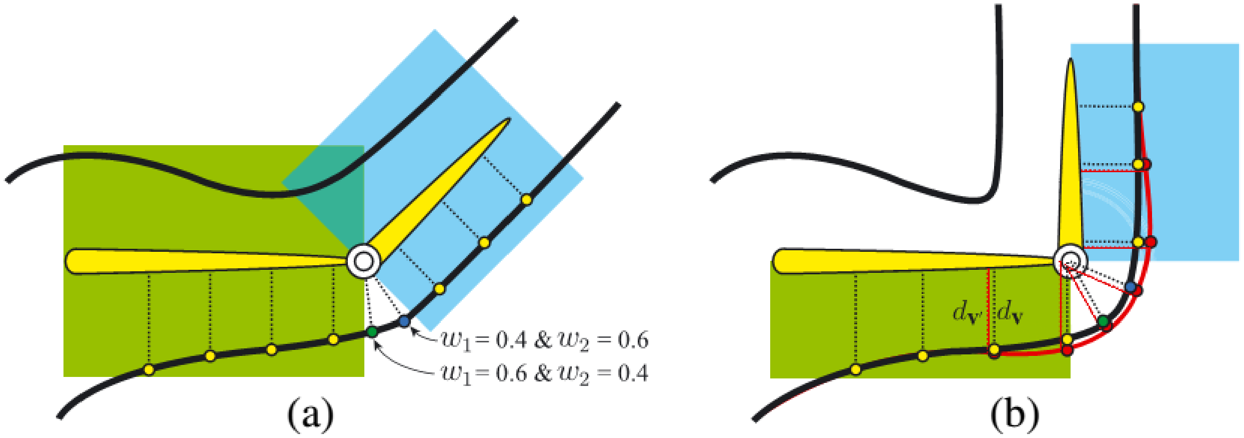
Elasticity-Inspired Deformers for Character Articulation [Kavan SIGGRAPHAsia12]
Bulging-free dual quaternion skinning [Kim CASA14]

DQS の欠点の克服



[Kavan 12]

変換を bend と twist に分解し、別々に補間

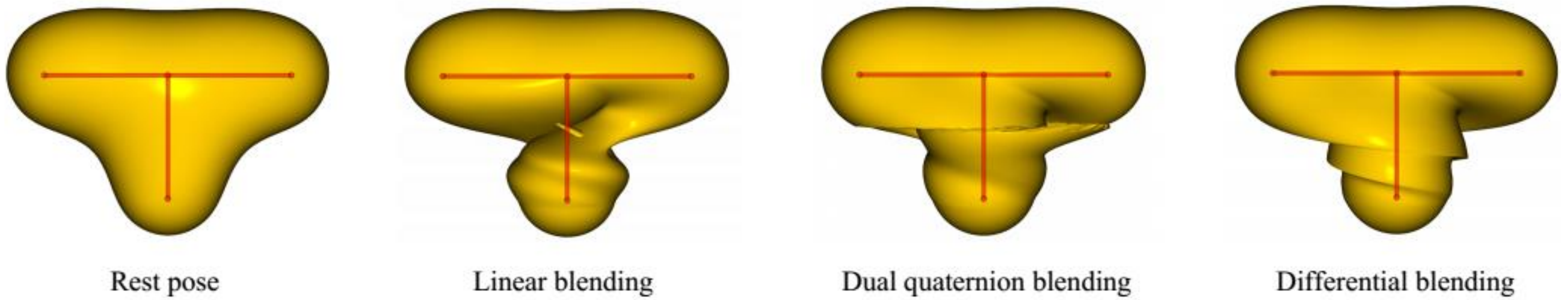


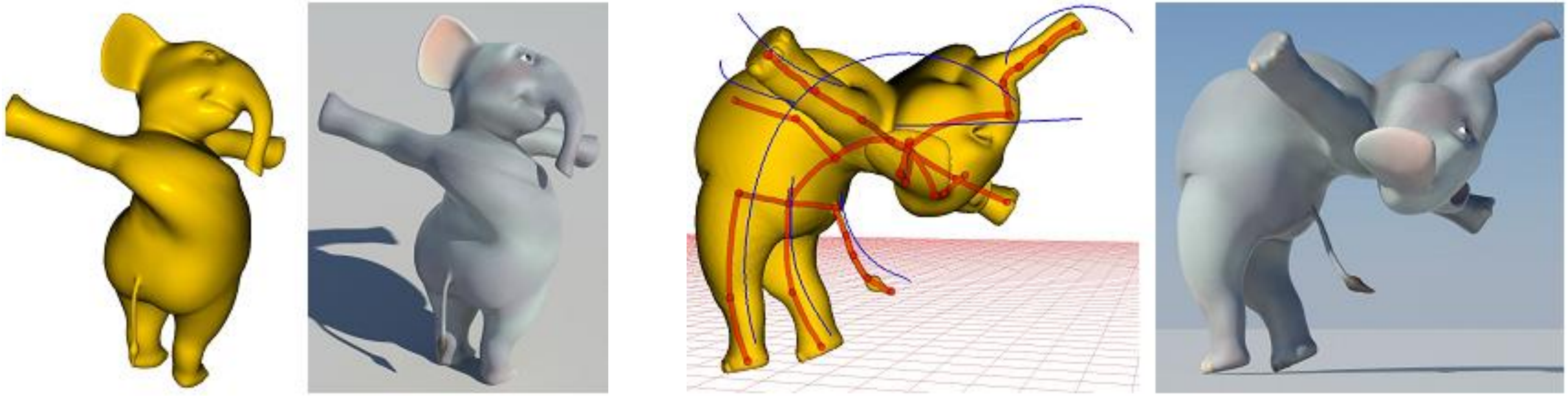
[Kim 14]

DQS で動かした後、法線方向にオフセット

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

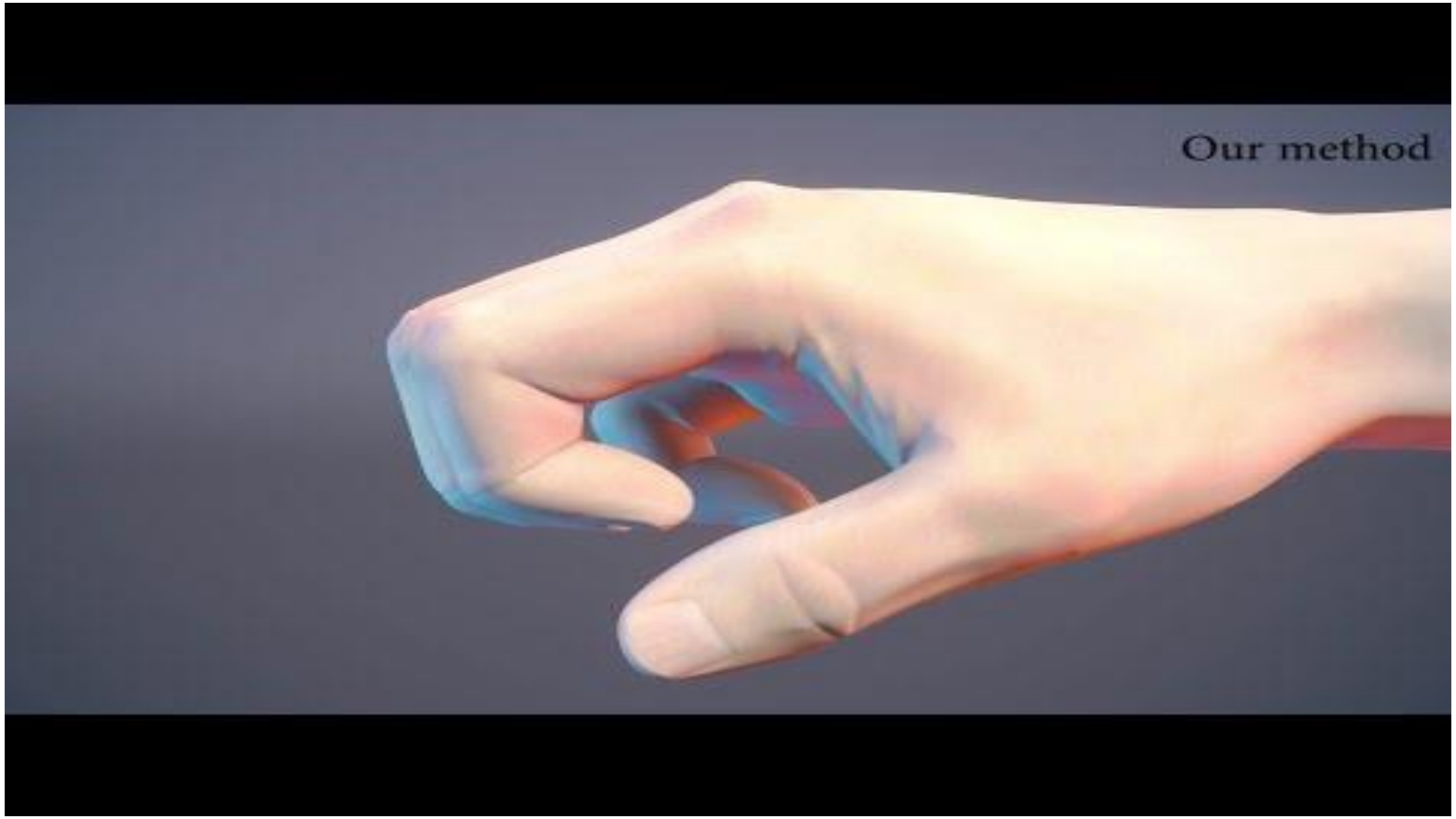




Differential Blending for Sketch-based Expressive Posing [Oztireli SCA13]

自己交差を回避するスキニング

- 陰関数の性質を活用

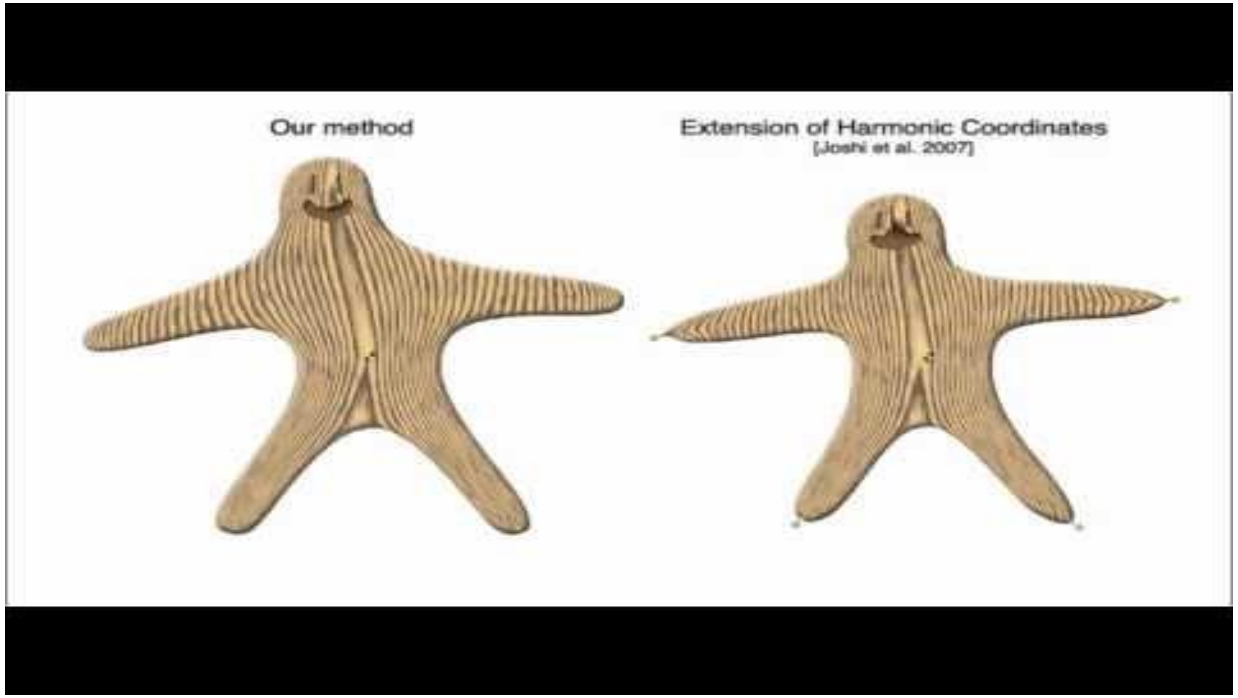


https://www.youtube.com/watch?v=RHySGIqEgyk

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

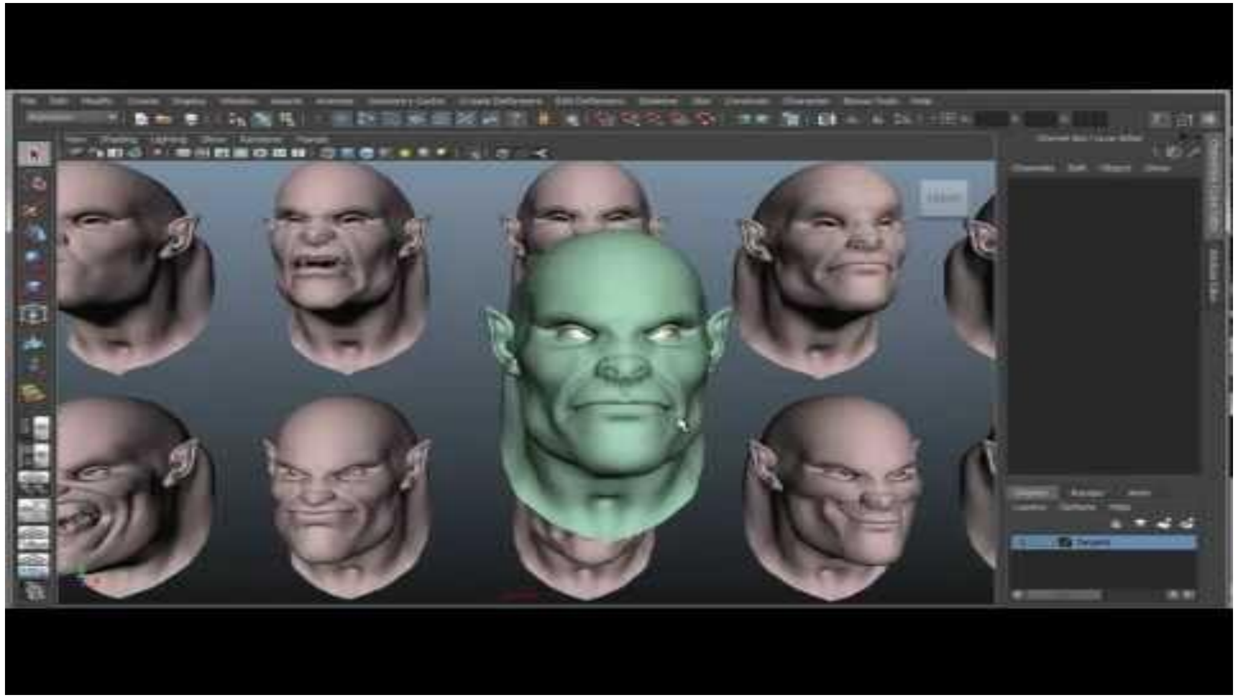
スケルトン以外の変形インタフェース

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