

コンピュータグラフィクス論

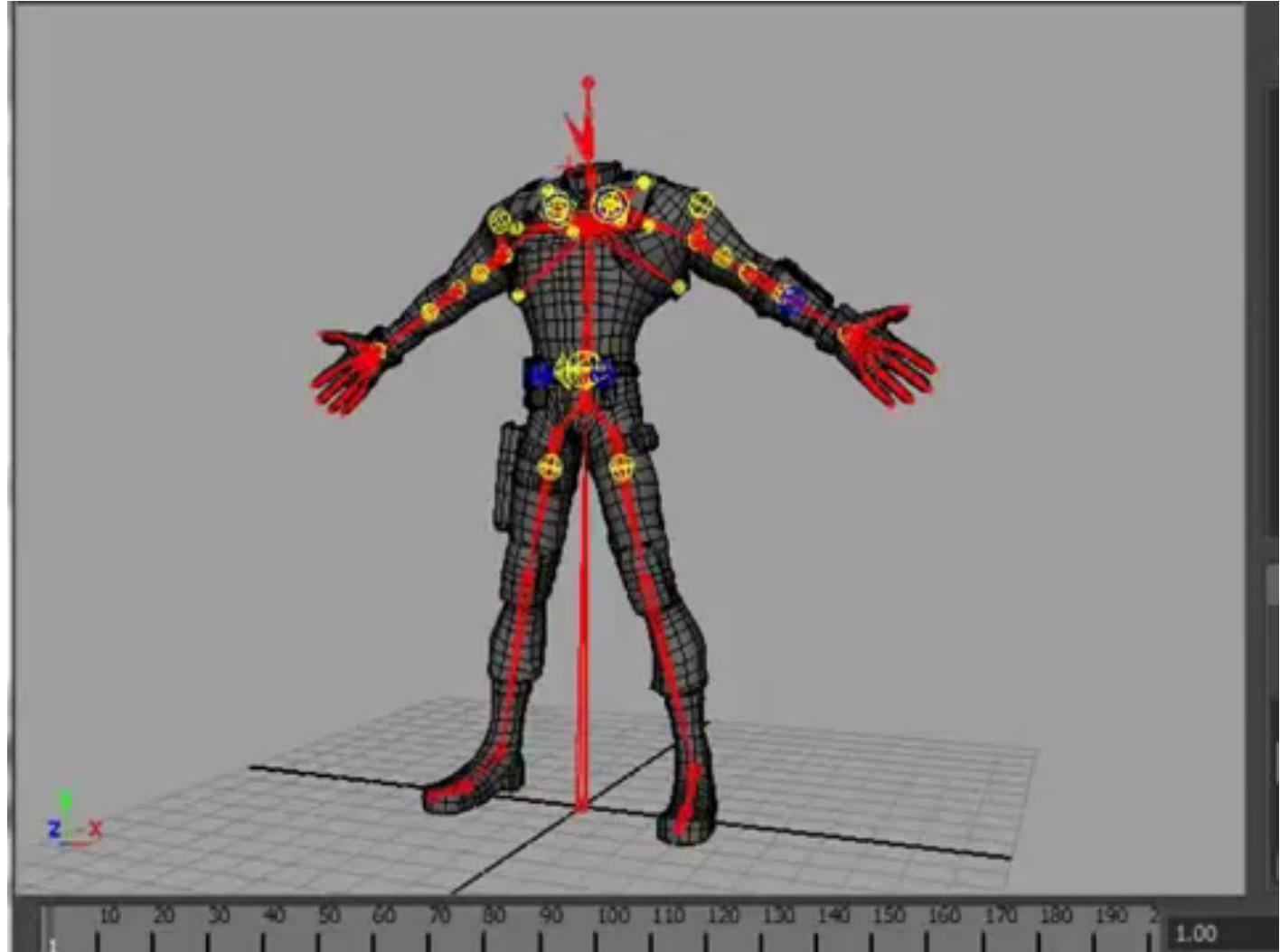
– アニメーション(1) –

2021年5月13日

高山 健志

スケルトンによるアニメーション

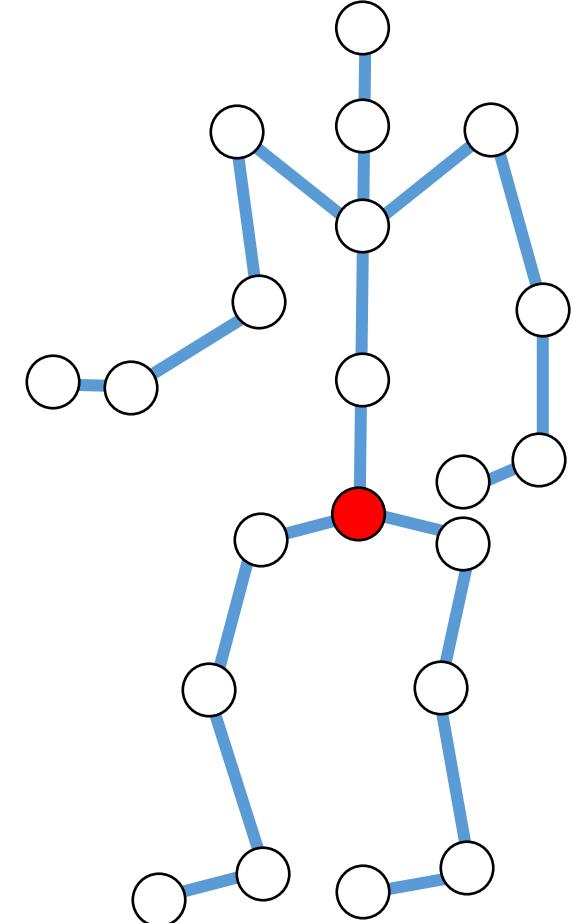
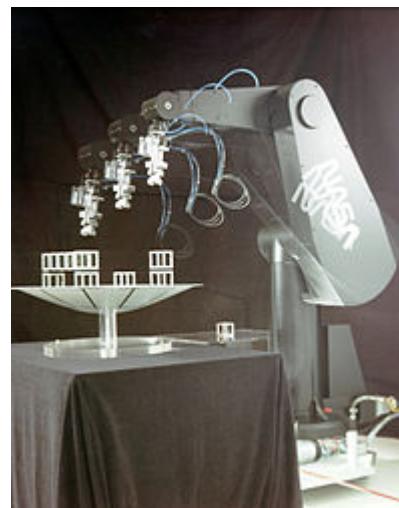
- ・単純な仕組み
- ・直感的な挙動
- ・低い計算コスト



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

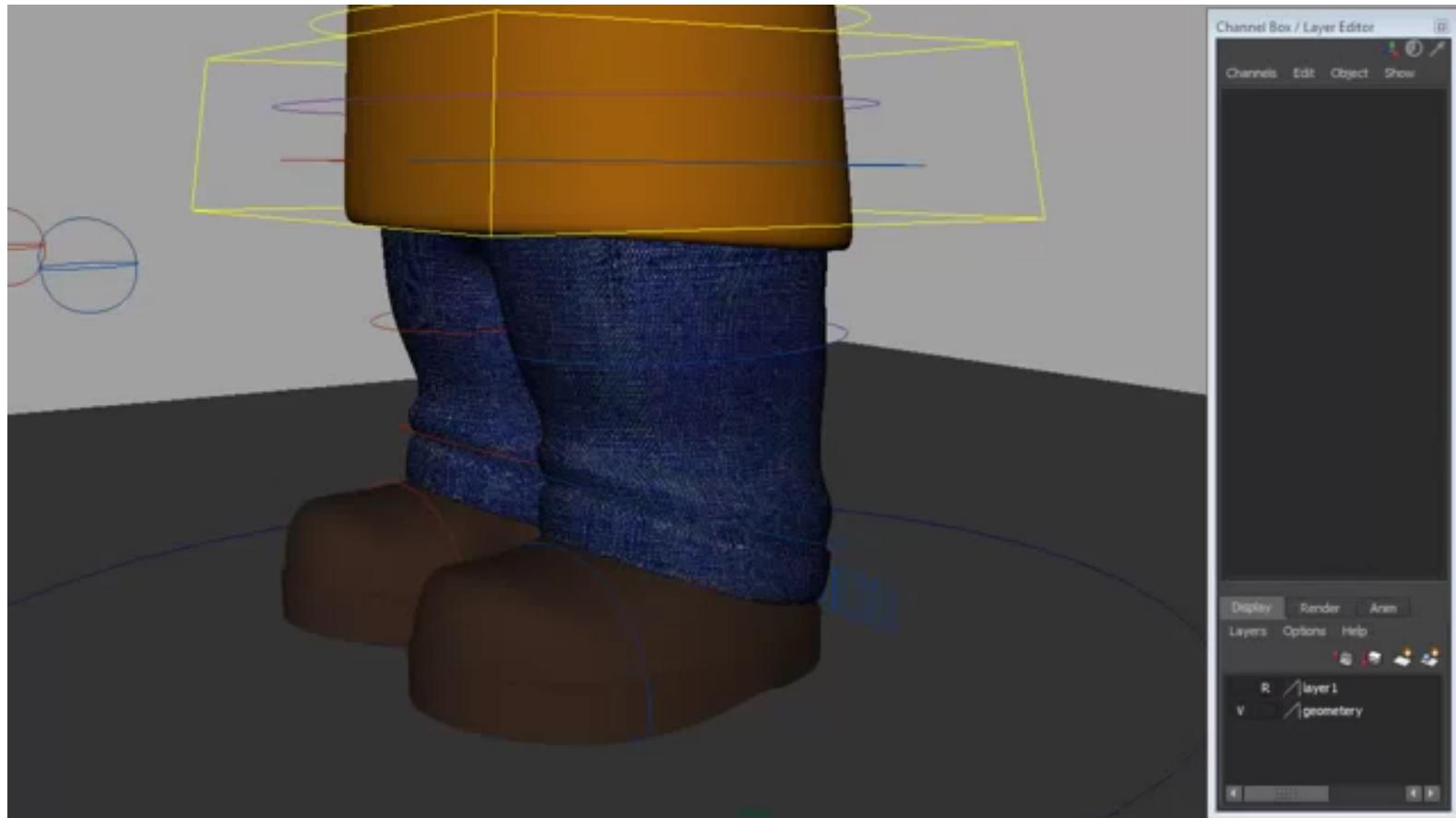
スケルトンによる姿勢の表現

- ・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
(Forward Kinematics)
- ・ロボティクス分野と深く関連



Inverse Kinematics

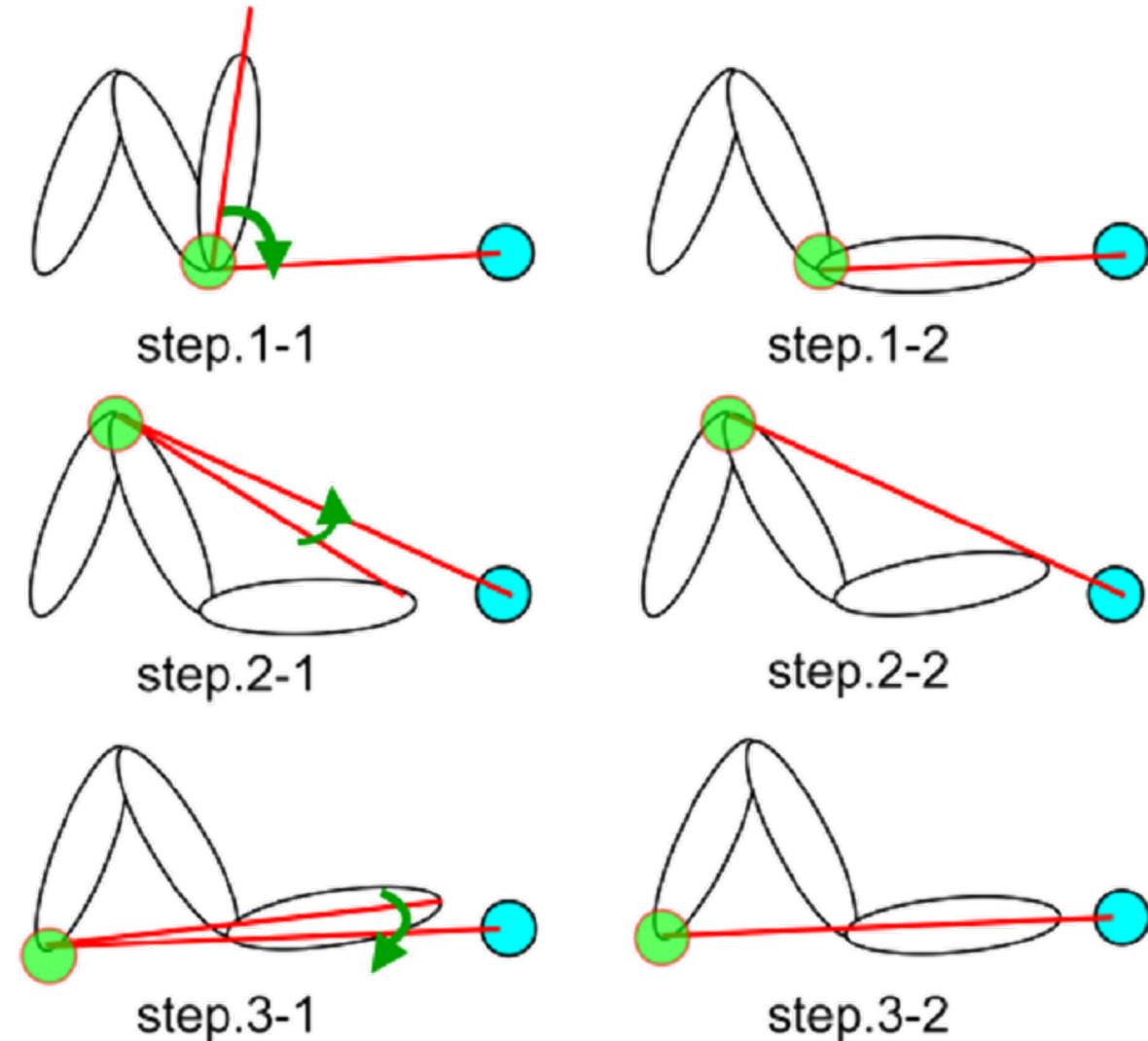
- 末端関節の位置を与えると、それを満たす関節角を逆算
- IKで手早く姿勢を作り、FKで微調整
- FKでポーズを再生し、IKで環境との接触を調整（接地など）



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]



変形エネルギーに基づく IK

Fast Automatic Skinning Transformations

Alec Jacobson¹

Ilya Baran²

Ladislav Kavan¹

Jovan Popović³

Olga Sorkine¹

¹ETH Zurich

²Disney Research, Zurich

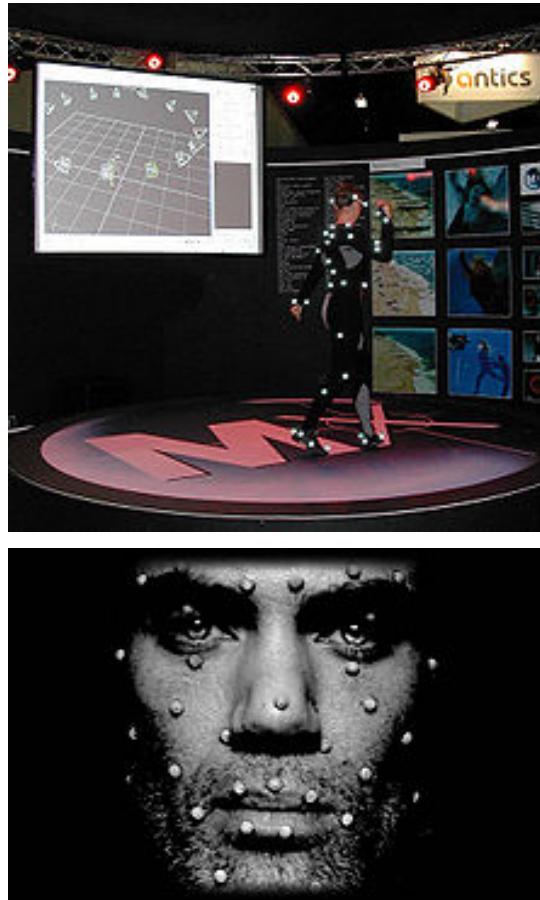
³Adobe Systems, Inc.

This video contains narration.

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

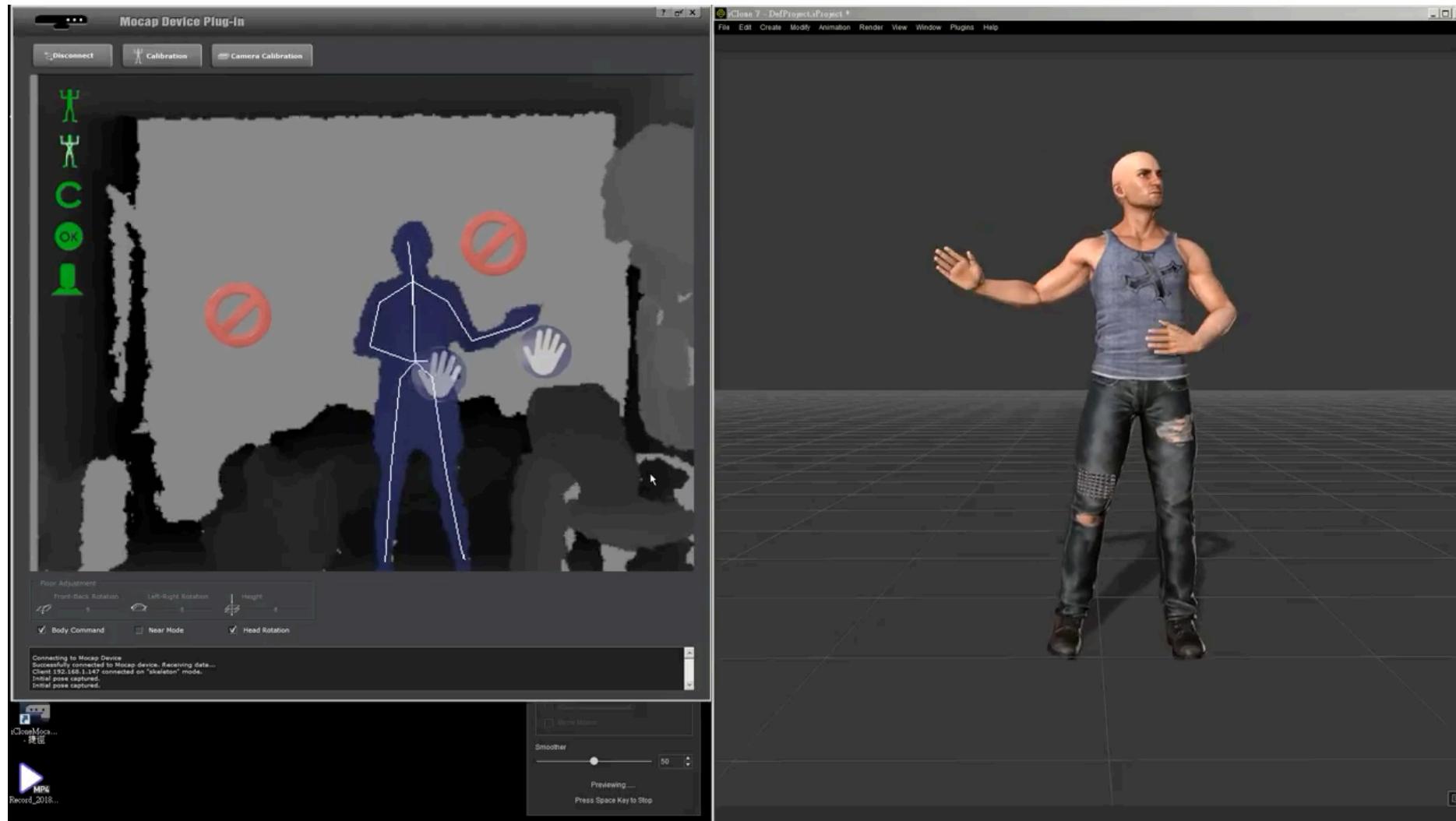


from Wikipedia



<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=zXDuyMtzunA>

屋外で使えるモーキャプ

Motion Capture from
Body-Mounted Cameras



(with audio)

Takaaki Shiratori , Hyun Soo Park , Leonid Sigal ,
Yaser Sheikh , Jessica K. Hodgins *

* Disney Research, Pittsburgh + Carnegie Mellon University

<https://www.youtube.com/watch?v=xbl-NWMfGPs>

ドローンの自動追跡によるモーキャプ

Motion planning by
FORCES^{PRO}

Parrot
BEBOP DRONE

Flycon: Environment-independent Human Pose Estimation with Aerial Vehicles

Tobias Nägeli, Samuel Oberholzer, Silvan Plüss, Javier Alonso-Mora, Otmar Hilliges

ACM SIGGRAPH Asia'18



Advanced Interactive
Technologies

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

TUDelft

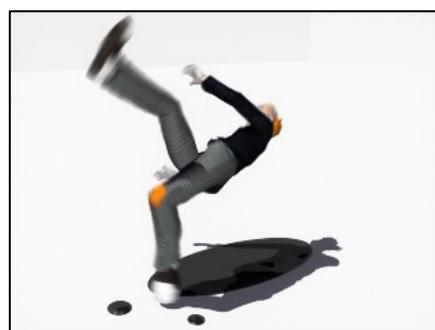
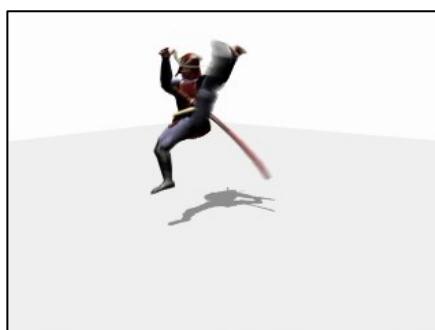
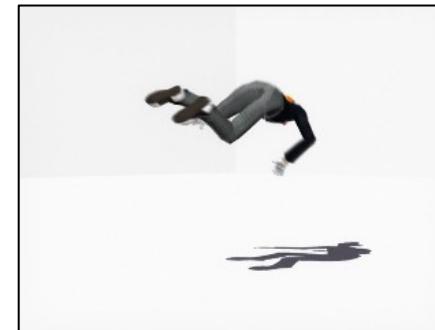
Delft
University of
Technology

<https://www.youtube.com/watch?v=iSJY-vHDmHQ>

Flycon: real-time environment-independent multi-view human pose estimation with aerial vehicles [Nageli]

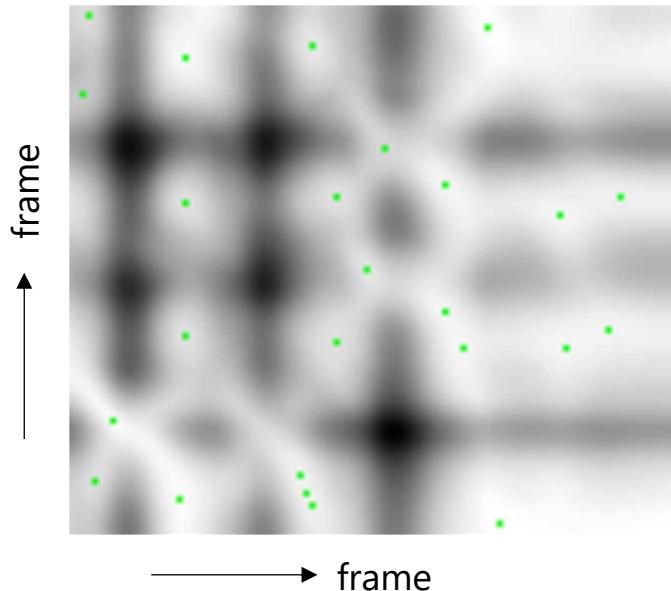
モーションデータベース

- <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)

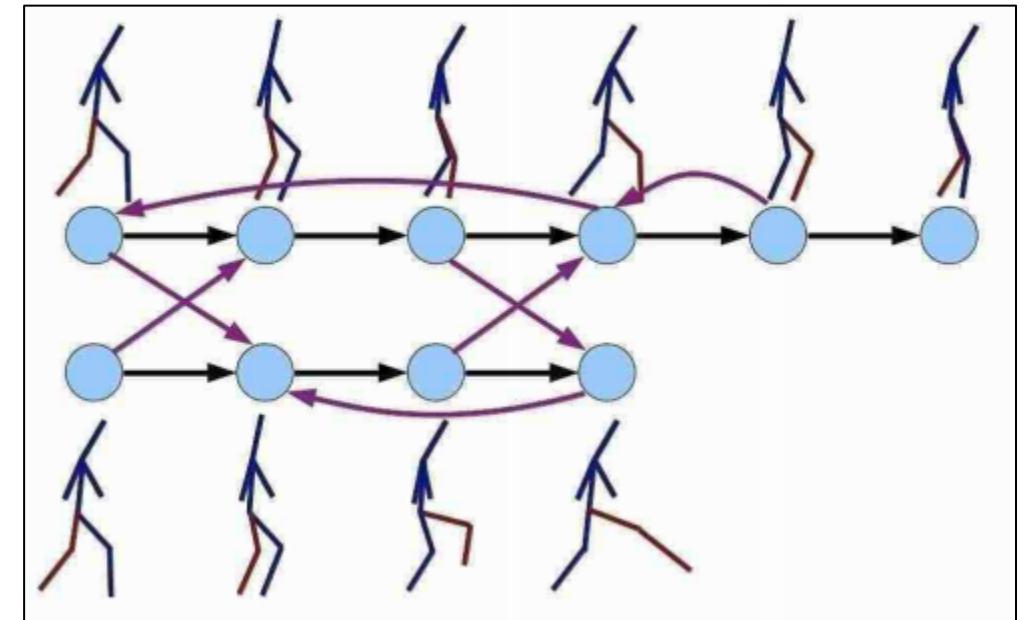
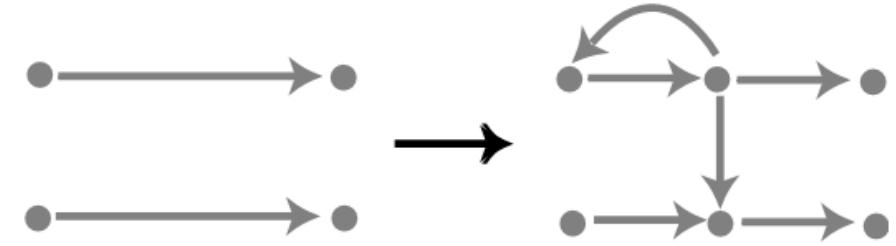


モーションの連結

- 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]

<https://graphics.cs.wisc.edu/Papers/2002/KGP02/mograph.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

Flexible Muscle-Based Locomotion for Bipedal Creatures

SIGGRAPH ASIA 2013

Thomas Geijtenbeek
Michiel van de Panne
Frank van der Stappen

<https://www.youtube.com/watch?v=pgaEE27nsQw>

専用デバイスによるポーズ作成

Tangible and Modular Input Device for Character Articulation

Alec Jacobson¹

Daniele Panozzo¹

Oliver Glauser¹

Cédric Pradalier²

Otmar Hilliges¹

Olga Sorkine-Hornung¹

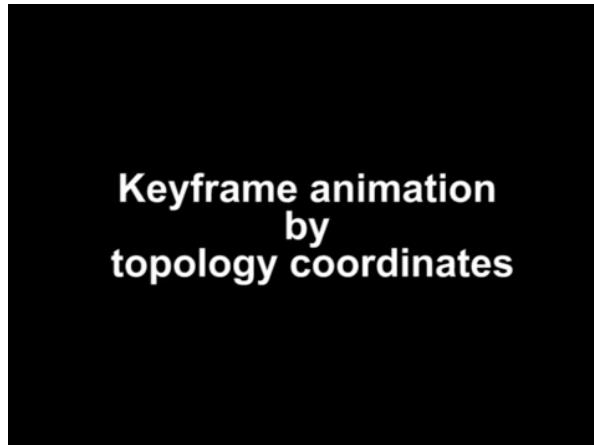
¹ETH Zurich

²Georgia Tech Lorraine



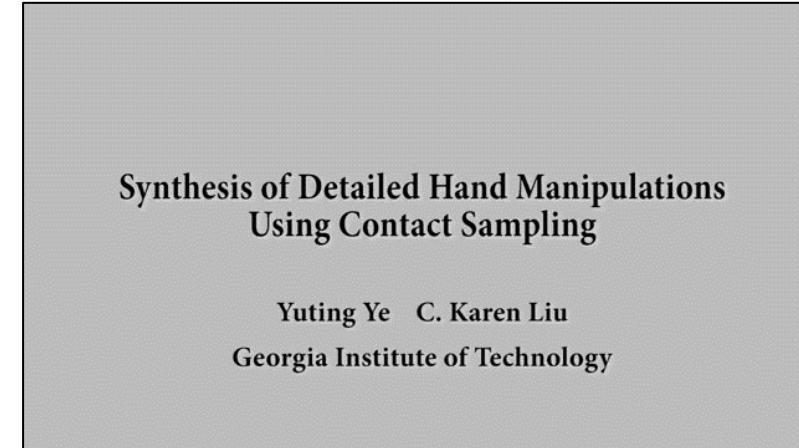
This video contains narration

キャラクタの動きに関する様々なトピック



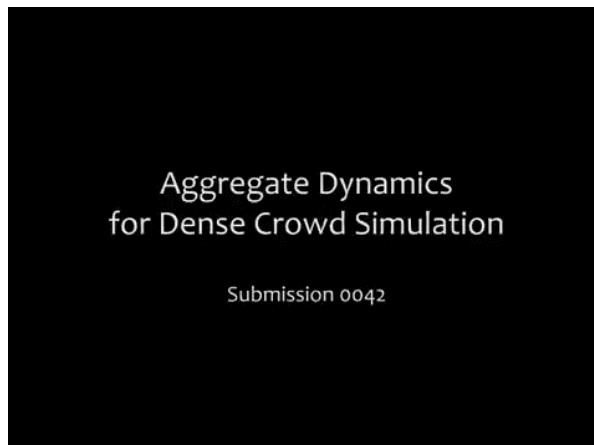
複数キャラクタの
インタラクション

[https://www.youtube.com/
watch?v=1S_6wSKI_nU](https://www.youtube.com/watch?v=1S_6wSKI_nU)



物体をつかむ動作

[https://www.youtube.com/
watch?v=x8c27XYTLTo](https://www.youtube.com/watch?v=x8c27XYTLTo)



群衆シミュレーション

[https://www.youtube.com/
watch?v=pqBSNAOsMDc](https://www.youtube.com/watch?v=pqBSNAOsMDc)



Path planning

<https://vimeo.com/33409868>

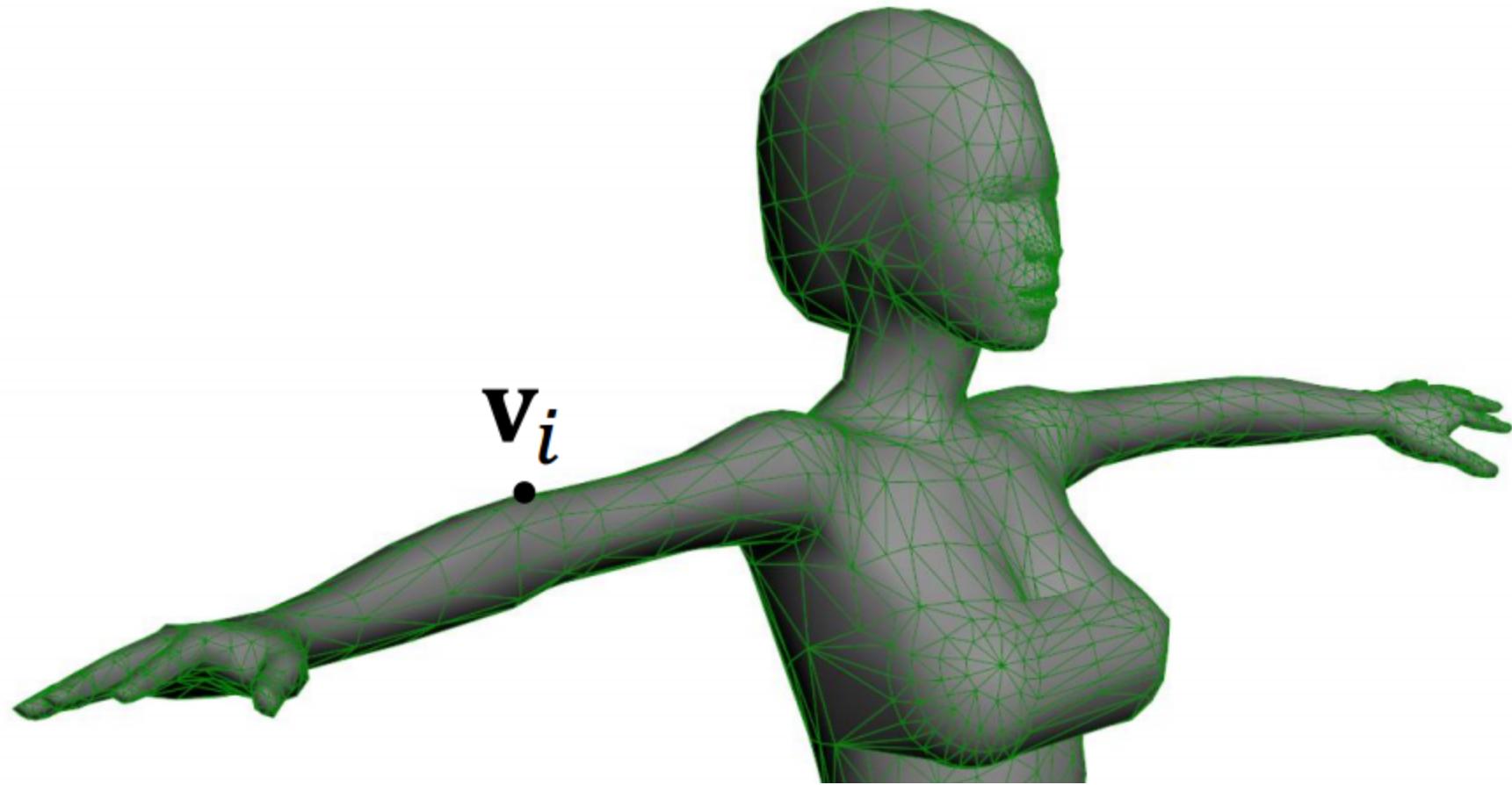
Character motion synthesis by topology coordinates [Ho EG09]

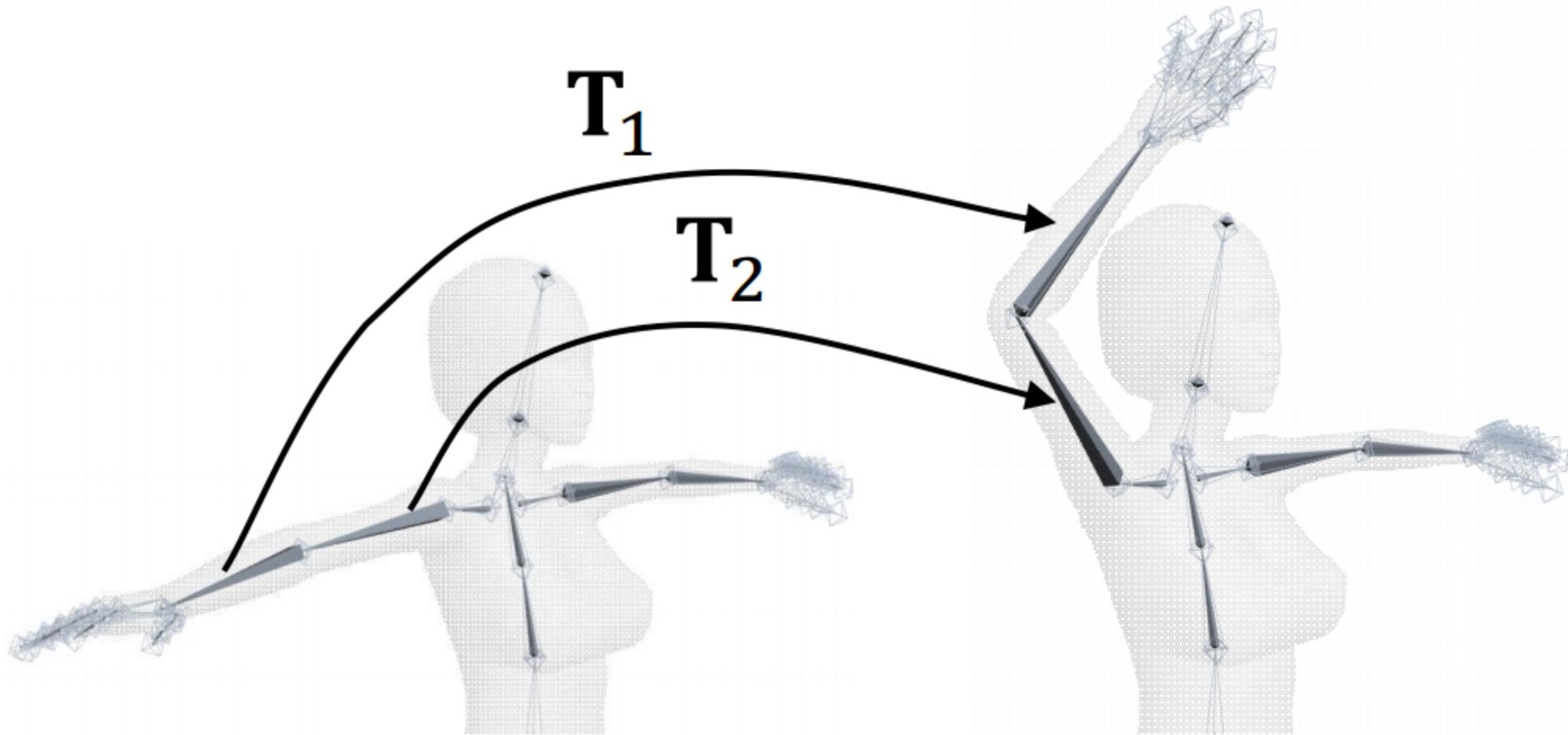
Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation [Narain SIGGRAPHAsia09]

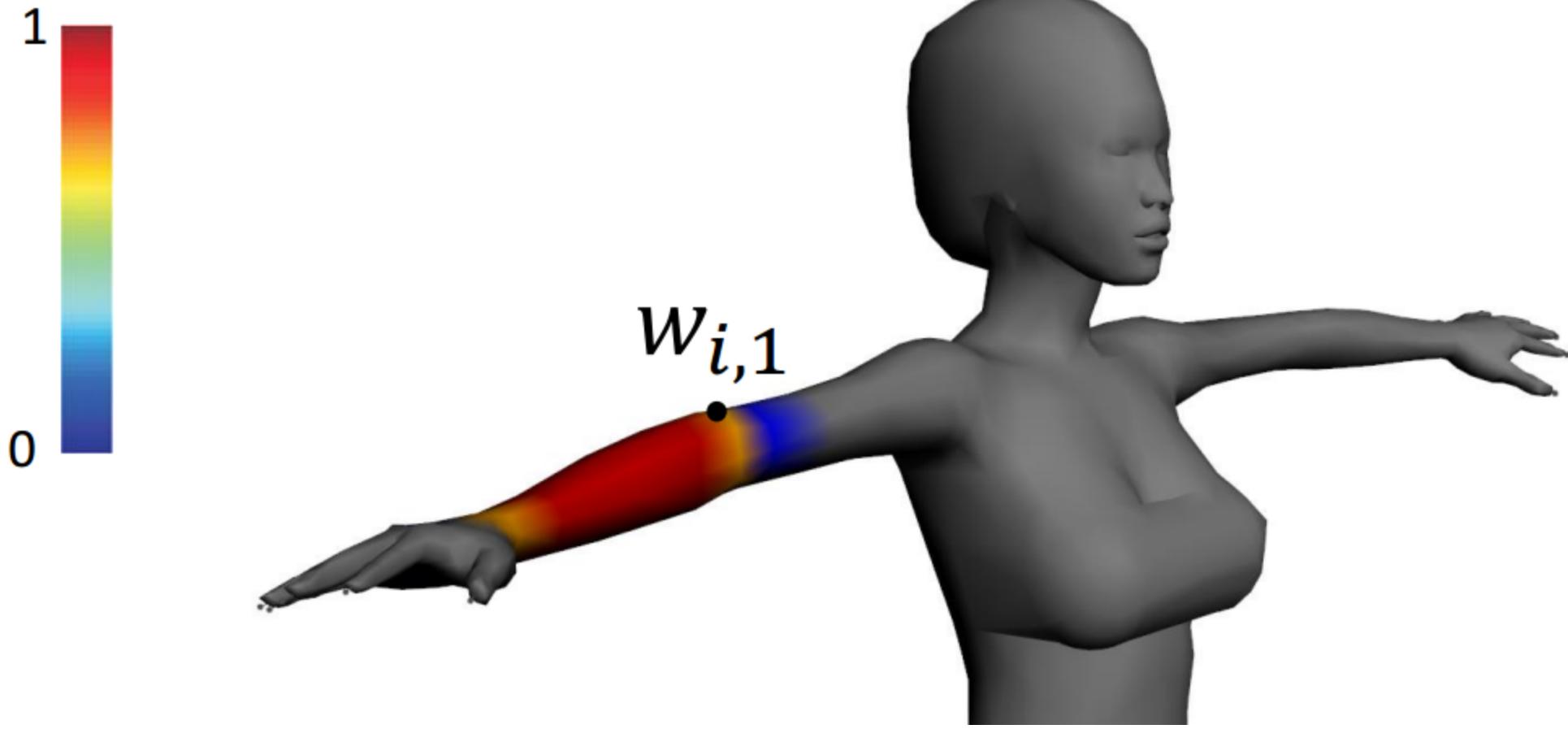
Synthesis of Detailed Hand Manipulations Using Contact Sampling [Ye SIGGRAPH12]

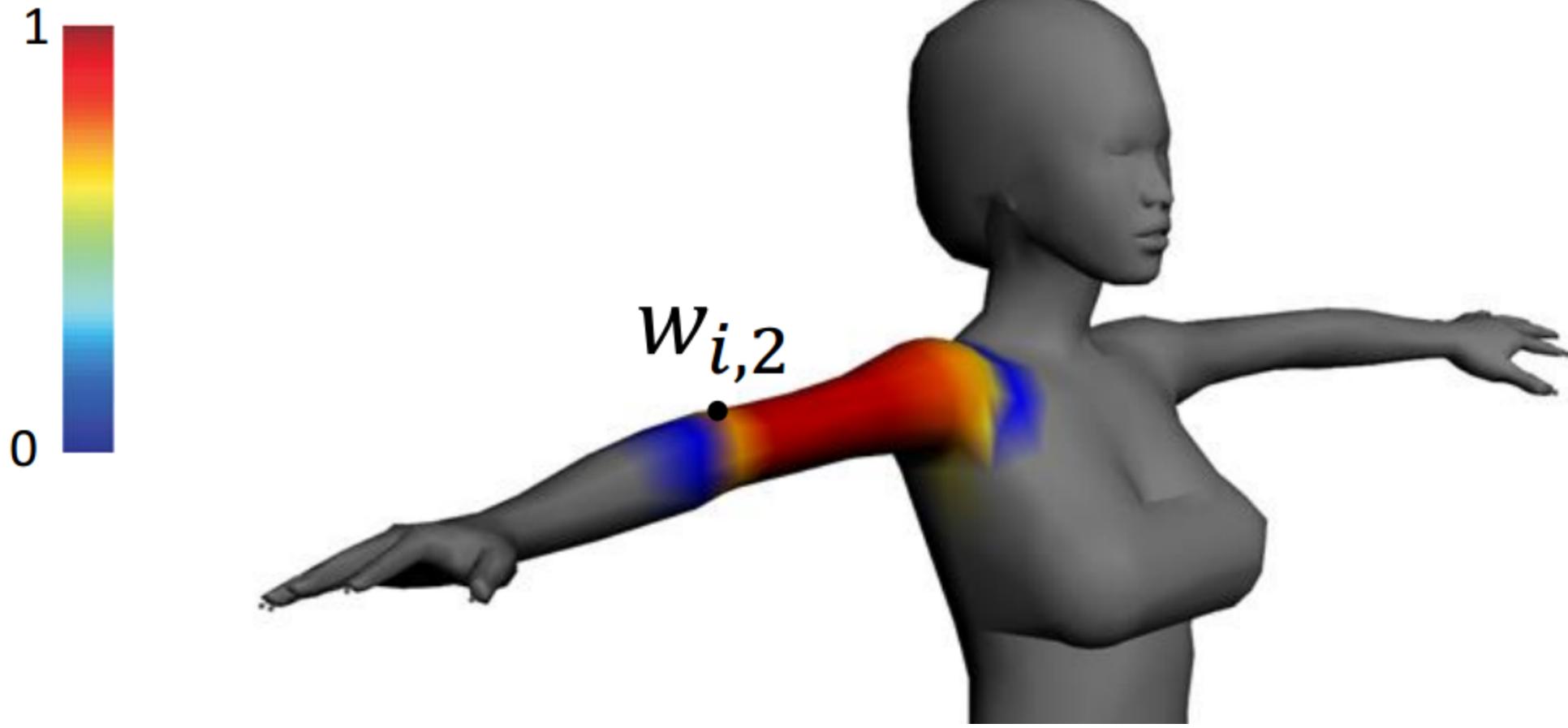
Space-Time Planning with Parameterized Locomotion Controllers.[Levine TOG11]

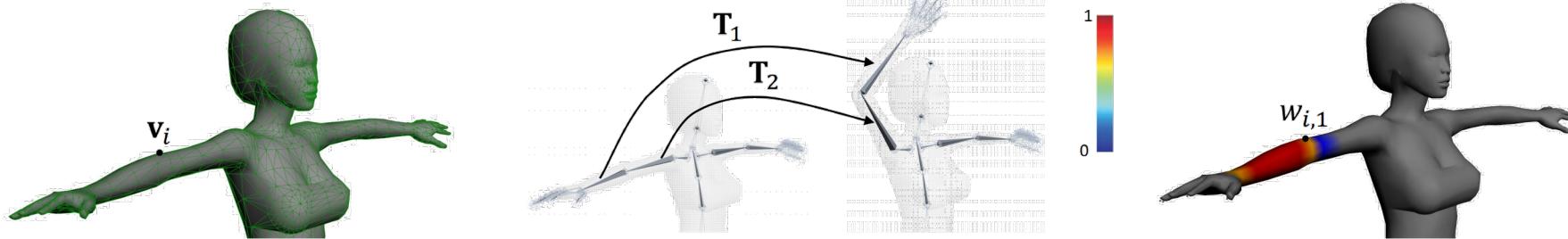
スキニング







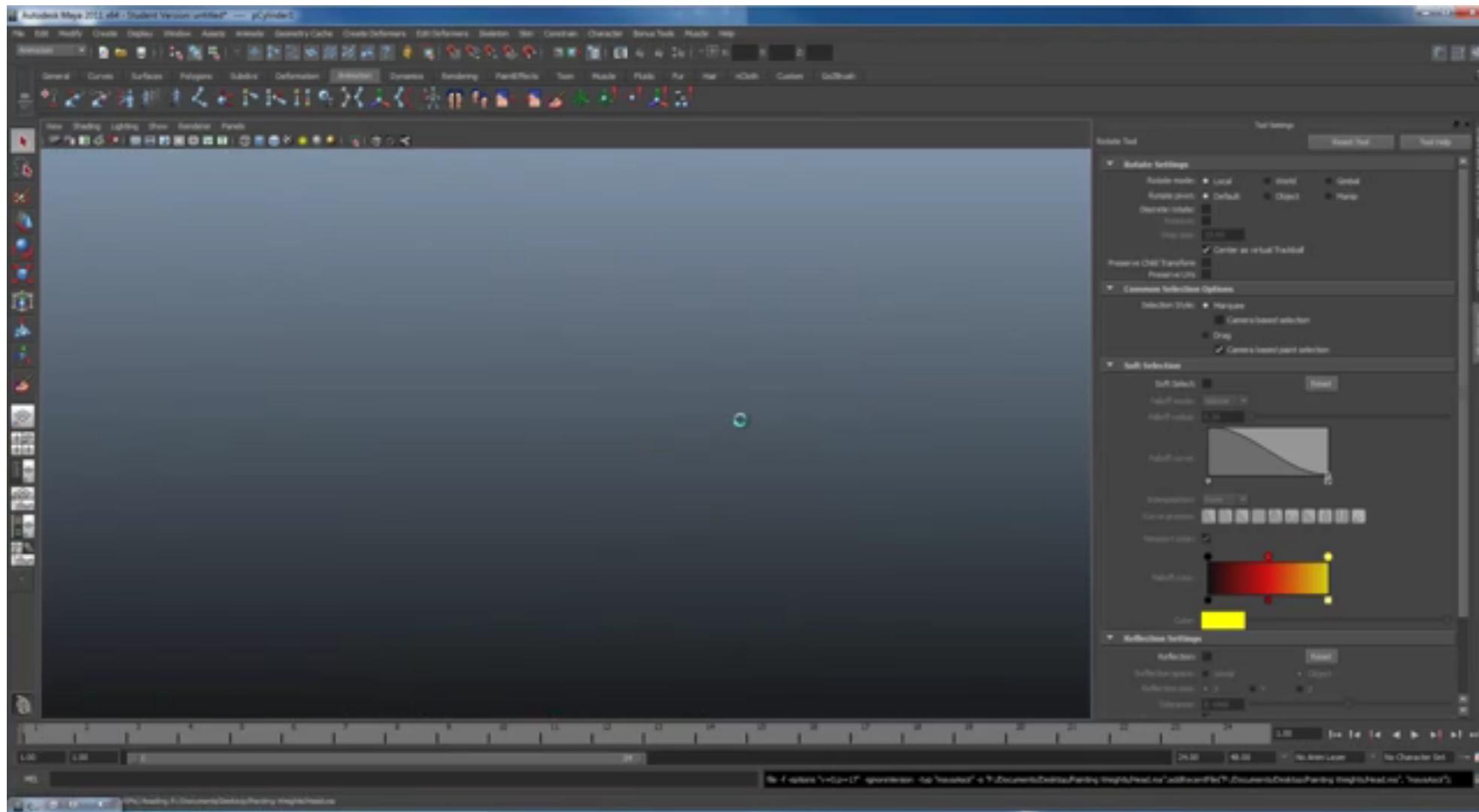




$$\mathbf{v}'_i = \text{blend}\left(\langle w_{i,1}, \mathbf{T}_1 \rangle, \langle w_{i,2}, \mathbf{T}_2 \rangle, \dots\right)(\mathbf{v}_i)$$

- 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>

手作業で重みを与えるUIに関する研究

Spline Interface for Intuitive Skinning Weight Editing

Seungbae Bang and Sung-Hee Lee

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

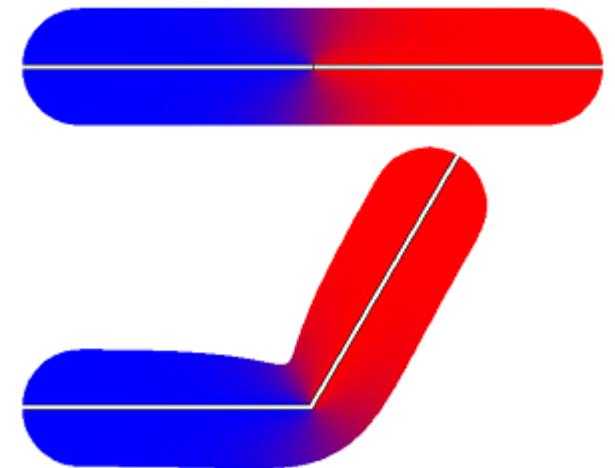
ACM Transactions on Graphics (TOG), 37(5):174, 2018



<https://www.youtube.com/watch?v=mfEP8BIXTgQ>

重みの与え方：自動計算

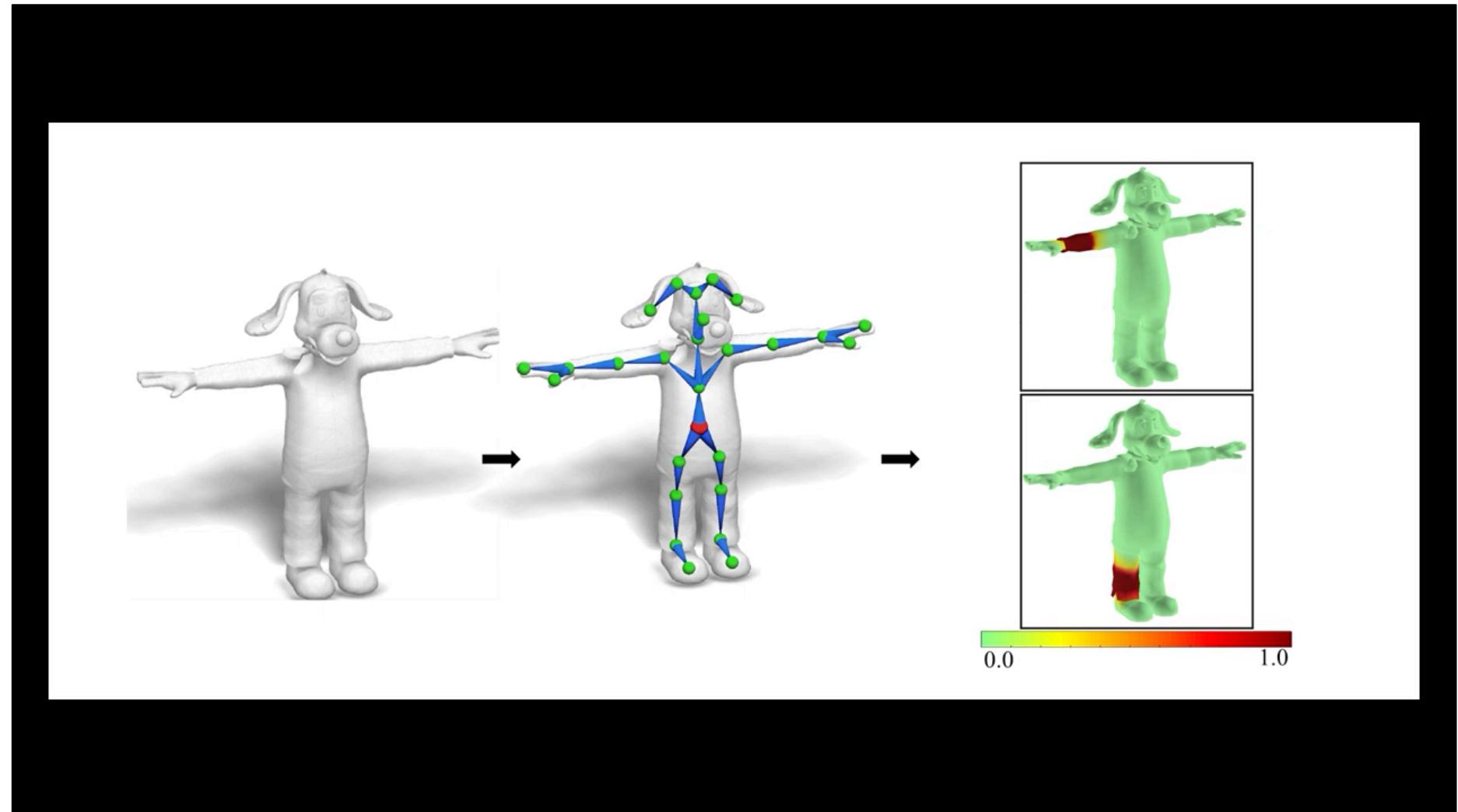
- j 番目のボーンの重み w_j を、
 - j 番目のボーン上で 1 を取り、それ以外のボーン上で 0 を取り、
 - それ以外では滑らかなスカラー場として定式化
- 一階微分 $\int_{\Omega} \|\nabla w_j\|^2 dA$ を最小化 [Baran 07]
 - サーフェス上で近似的に解く → 簡単、高速
- 二階微分 $\int_{\Omega} (\Delta w_j)^2 dA$ を最小化 [Jacobson 11]
 - 不等式制約 $0 \leq w_j \leq 1$ も導入
 - ボリューム上で二次計画問題を解く → 高品質



Teddy/Pinocchio デモ

最近の論文：機械学習による自動リギング

スケルトン構造と
スキニングの重みを
同時に推定



<https://www.youtube.com/watch?v=J90VETgWIDg>

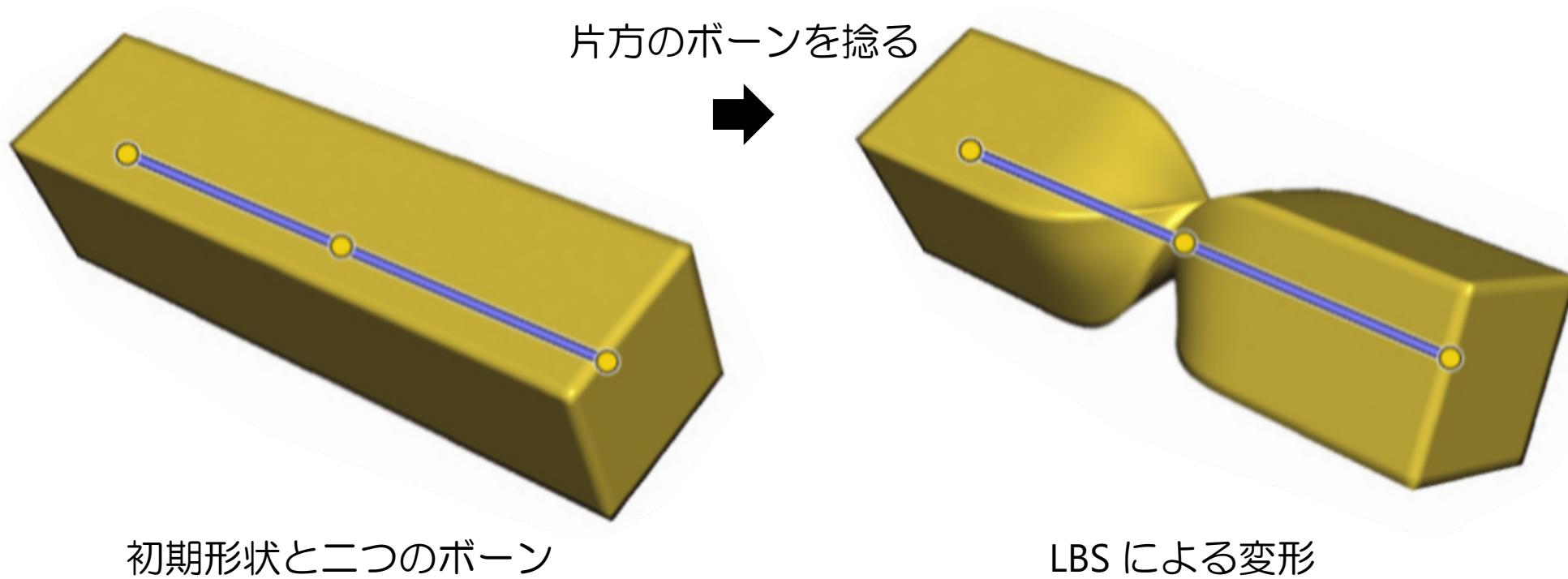
変換の混合手法：Linear Blend Skinning

- 剛体変換 \mathbf{T}_j は、回転行列 $\mathbf{R}_j \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 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

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

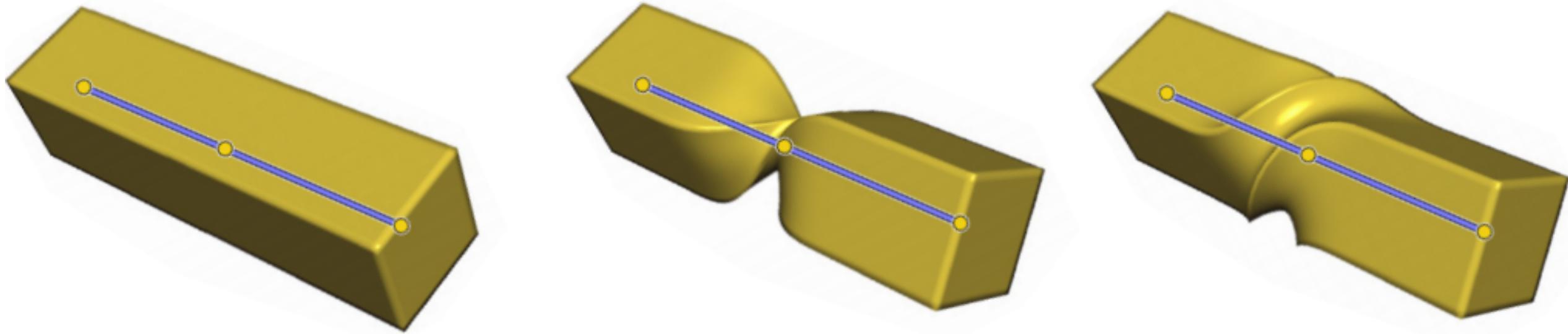
- 単純で高速
 - 頂点シェーダで実装：フレーム毎に $\{\mathbf{v}'_i\}$ を GPU に送るのではなく、初期化時に $\{\mathbf{v}_i\}$ と $\{w_{i,j}\}$ を送り、フレーム毎に $\{\mathbf{T}_j\}$ を送る
- 業界で最も一般的

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 : Dual Quaternion Skinning



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 ε 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 : $\hat{a} := a_0 + \varepsilon a_\varepsilon$

- Dual 共役 :

$$\bar{a} = \overline{a_0 + \varepsilon a_\varepsilon} = a_0 - \varepsilon a_\varepsilon$$

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

- 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

$$\hat{\mathbf{q}} := \mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon$$

- 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 :

$$\hat{\mathbf{q}}^* = (\mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon)^* = \mathbf{q}_0^* + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon^*$$

Dual number / quaternion の演算規則

- Dual number $\hat{a} = a_0 + \varepsilon a_\varepsilon$ について：

- 逆数

$$\frac{1}{\hat{a}} = \frac{1}{a_0} - \varepsilon \frac{a_\varepsilon}{a_0^2}$$

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

- 平方根

$$\sqrt{\hat{a}} = \sqrt{a_0} + \varepsilon \frac{a_\varepsilon}{2\sqrt{a_0}}$$

- 三角関数

$$\sin \hat{a} = \sin a_0 + \varepsilon a_\varepsilon \cos a_0$$

$$\cos \hat{a} = \cos a_0 - \varepsilon a_\varepsilon \sin a_0$$

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 $\langle \mathbf{q}_0, \mathbf{q}_\varepsilon \rangle = 0$

Dual quaternion による剛体変換

- 平行移動成分が $\vec{t} = (t_x, t_y, t_z)$ 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 :

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

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 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ の剛体変換：

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

- \vec{v}' が変換後の3D座標

Dual quaternion による剛体変換

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

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

$$= \left(\mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \right) (1 + \varepsilon \vec{\mathbf{v}}) \overline{\left(\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2} (\vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0)^* \right)}$$

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

$$= \left(\mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \right) (1 + \varepsilon \vec{\mathbf{v}}) \left(\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}} \right)$$

$$= \left(\mathbf{q}_0 + \frac{\varepsilon}{2} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \right) \left(\mathbf{q}_0^* + \varepsilon \vec{\mathbf{v}} \mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}} + \frac{\varepsilon^2}{2} \vec{\mathbf{v}} \mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}} \right)$$

$$= \mathbf{q}_0 \mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \mathbf{q}_0^* + \varepsilon \mathbf{q}_0 \vec{\mathbf{v}} \mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon^2}{2} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \vec{\mathbf{v}} \mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2} \mathbf{q}_0 \mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}} + \frac{\varepsilon^2}{4} \vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0 \mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}}$$

$$(\vec{\mathbf{t}} \mathbf{q}_0)^* = \mathbf{q}_0^* (\vec{\mathbf{t}})^*$$

$$= -\mathbf{q}_0^* \vec{\mathbf{t}}$$

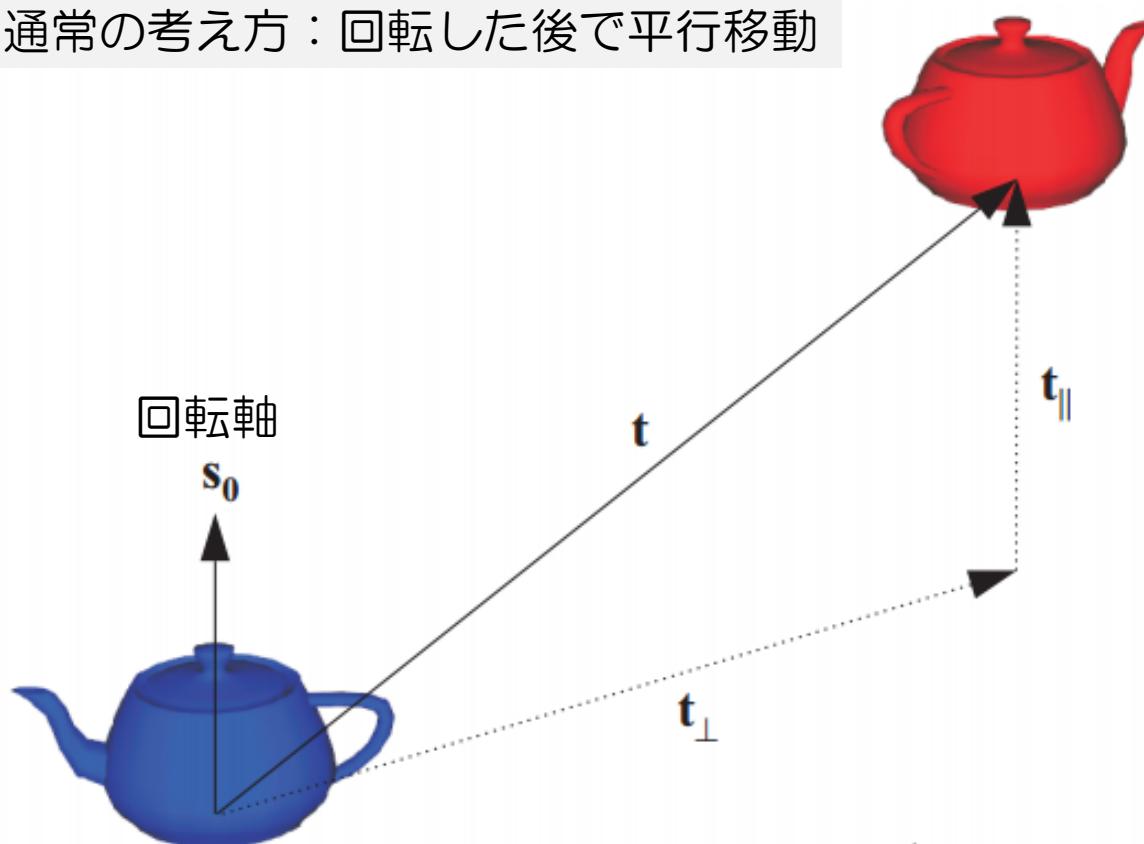
$$= 1 + \varepsilon (\vec{\mathbf{t}} + \mathbf{q}_0 \vec{\mathbf{v}} \mathbf{q}_0^*)$$

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

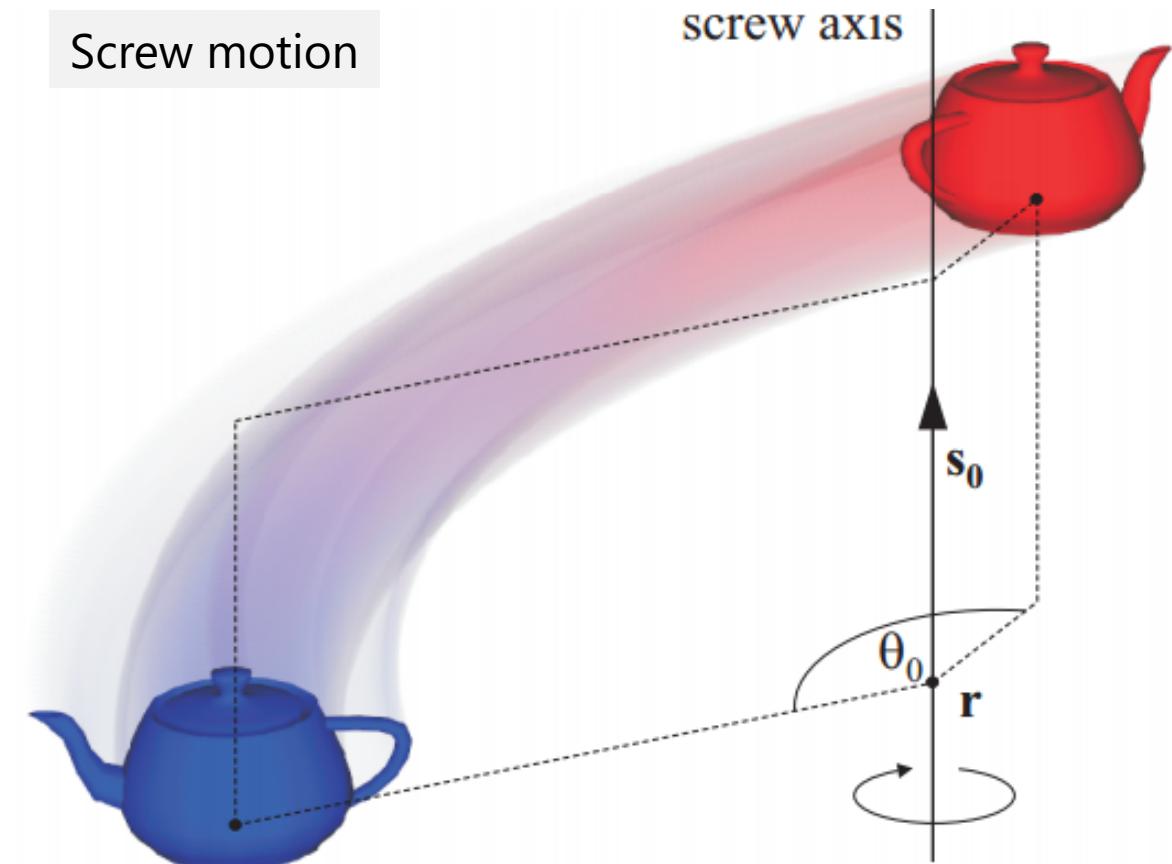
$$\|\mathbf{q}_0\|^2 = 1$$

“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

Screw motion と dual quaternion

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

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

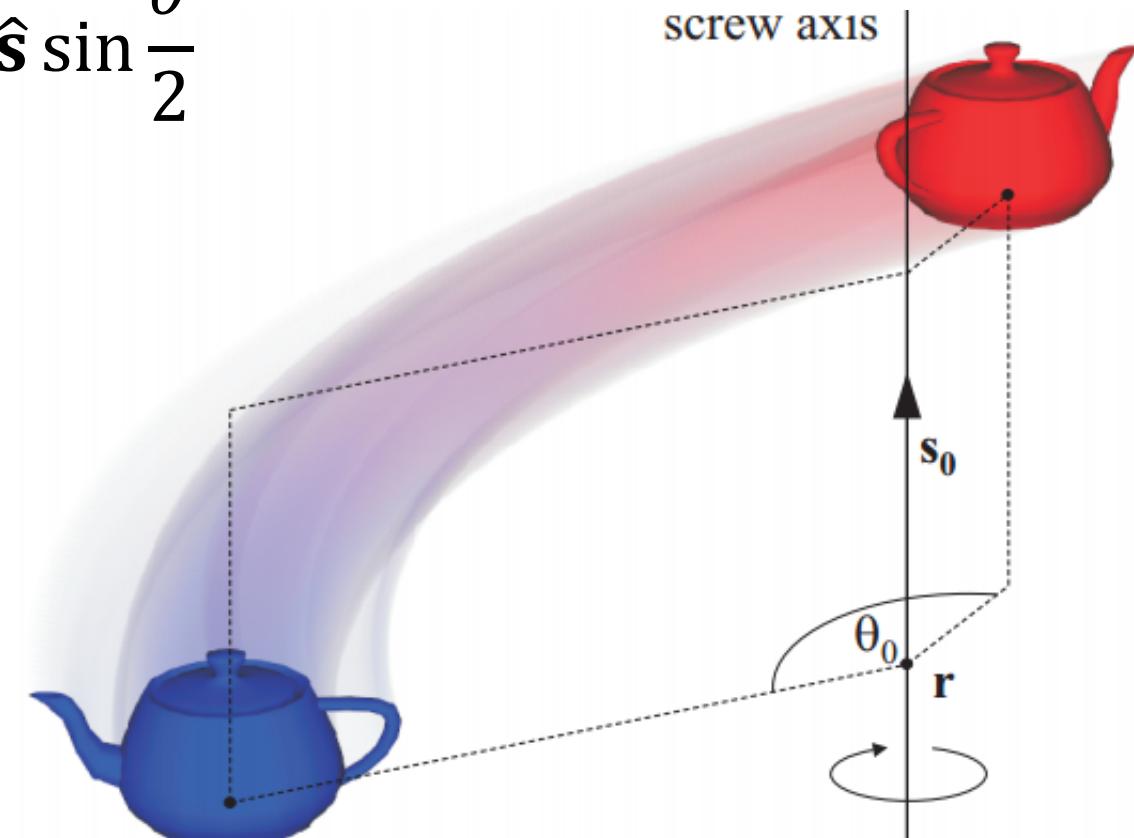
- $\hat{\theta} = \theta_0 + \varepsilon \theta_\varepsilon$
- $\hat{\mathbf{s}} = \vec{\mathbf{s}}_0 + \varepsilon \vec{\mathbf{s}}_\varepsilon$

$\theta_0, \theta_\varepsilon$: 実数

$\vec{\mathbf{s}}_0, \vec{\mathbf{s}}_\varepsilon$: 単位3Dベクトル

- 幾何的な意味

- $\vec{\mathbf{s}}_0$: 回転軸方向
- θ_0 : 回転量
- θ_ε : 回転軸方向の平行移動量
- $\vec{\mathbf{s}}_\varepsilon$: 回転軸が $\vec{\mathbf{r}}$ を通るとき、
 $\vec{\mathbf{s}}_\varepsilon = \vec{\mathbf{r}} \times \vec{\mathbf{s}}_0$ を満たす



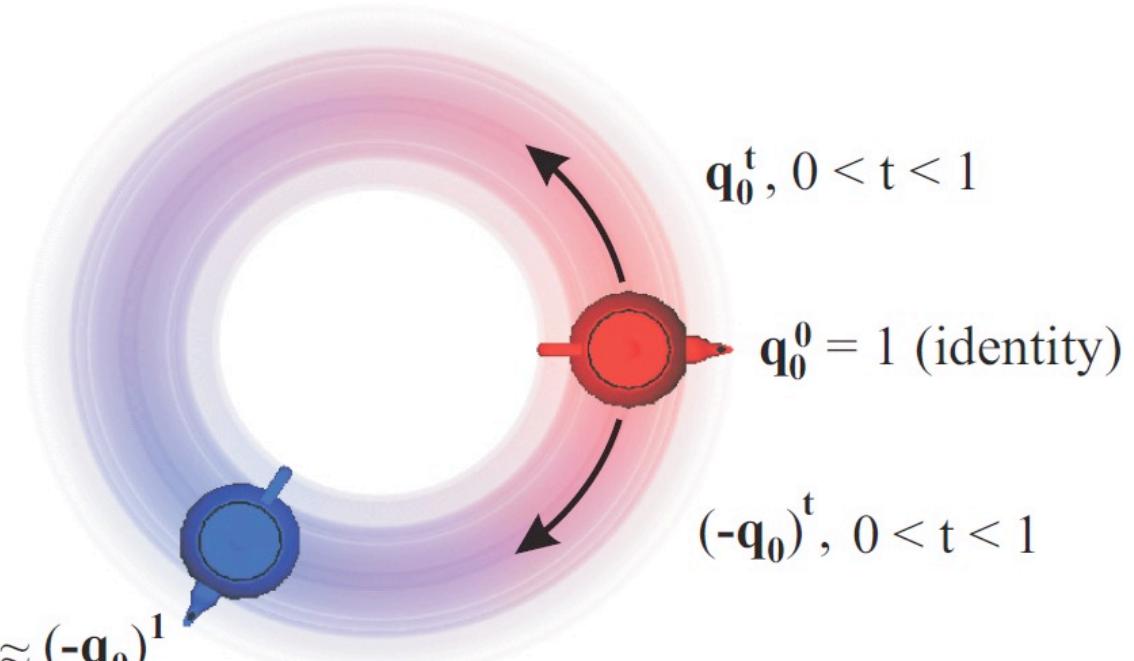
二つの剛体変換の補間

- 線形補間+正規化 (nlerp)

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

- 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

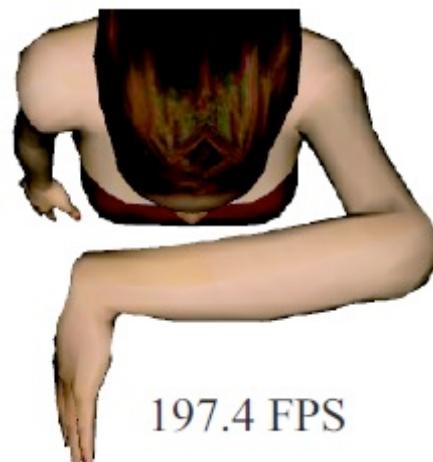


$$\mathbf{q}_0^1 \approx (-\mathbf{q}_0)^1$$

Dual quaternion による剛体変換のブレンド

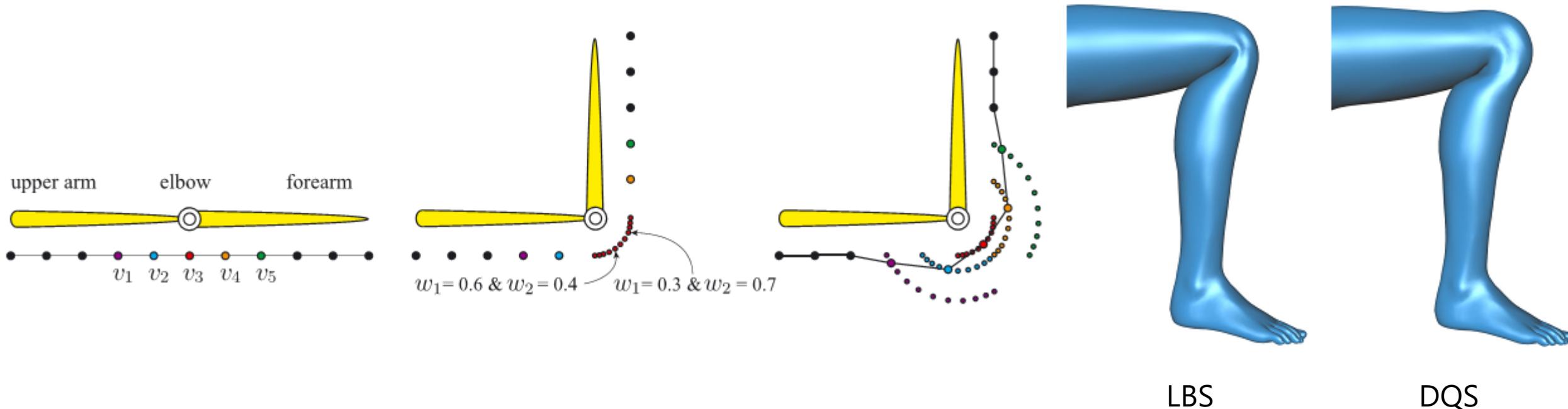
$$\text{blend}(\langle w_1, \hat{\mathbf{q}}_1 \rangle, \langle w_2, \hat{\mathbf{q}}_2 \rangle, \dots) := \frac{w_1 \hat{\mathbf{q}}_1 + w_2 \hat{\mathbf{q}}_2 + \dots}{\|w_1 \hat{\mathbf{q}}_1 + w_2 \hat{\mathbf{q}}_2 + \dots\|}$$

- 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



DQS の欠点：“bulging” effect

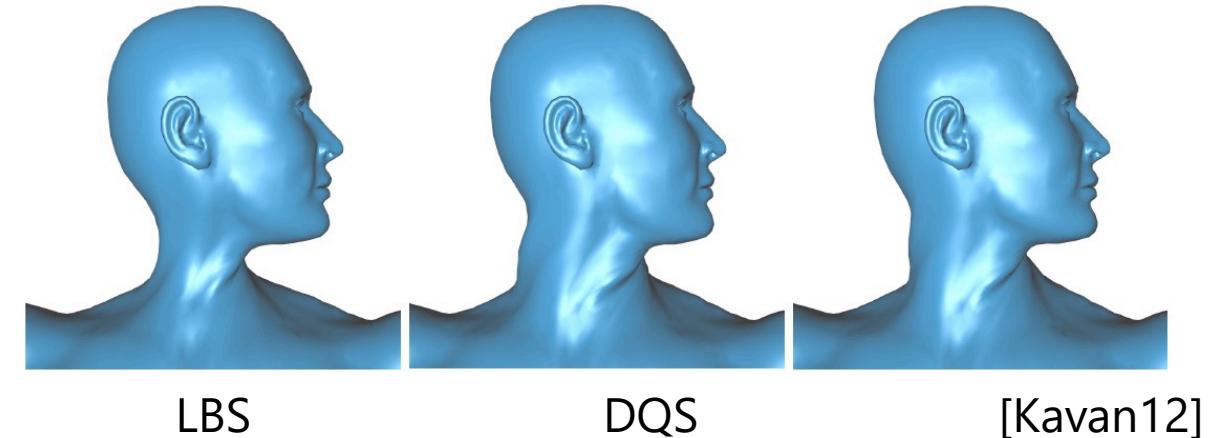
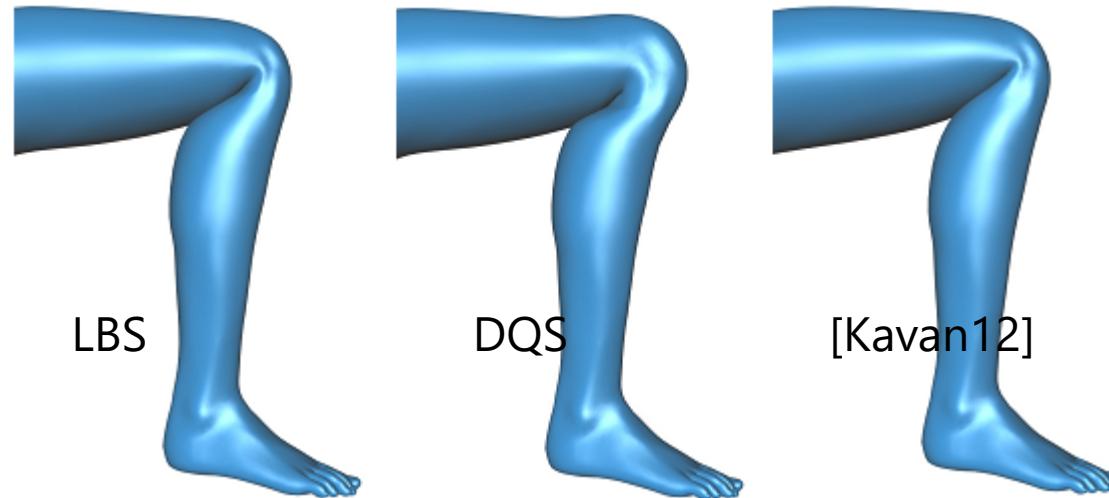
- 曲げの際に、関節を中心とした球面上に沿ったような軌跡を描く



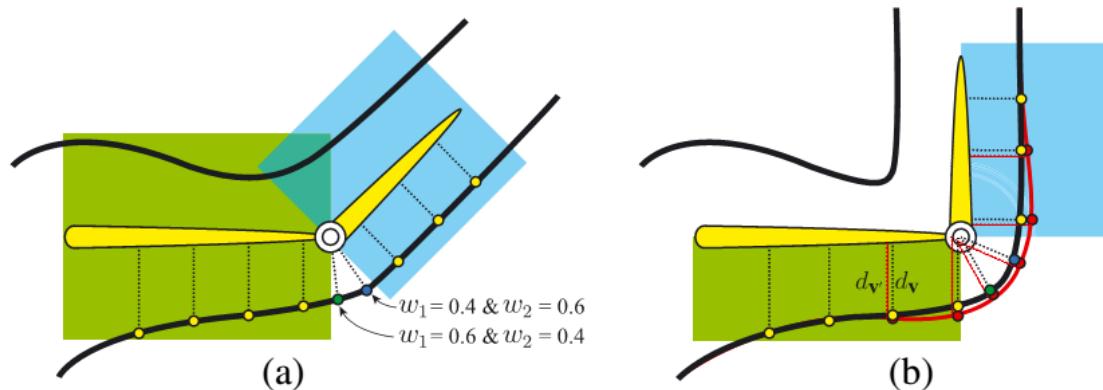
LBS

DQS

DQS の欠点の克服



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]

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>

スケルトン以外の変形インターフェース

点、ケージ、スケルトンの統合 [Jacobson 11]

Bounded Biharmonic Weights for Real-Time Deformation

Alec Jacobson¹

Ilya Baran²

Jovan Popović³

Olga Sorkine^{1,4}

¹New York University

²Disney Research, Zurich

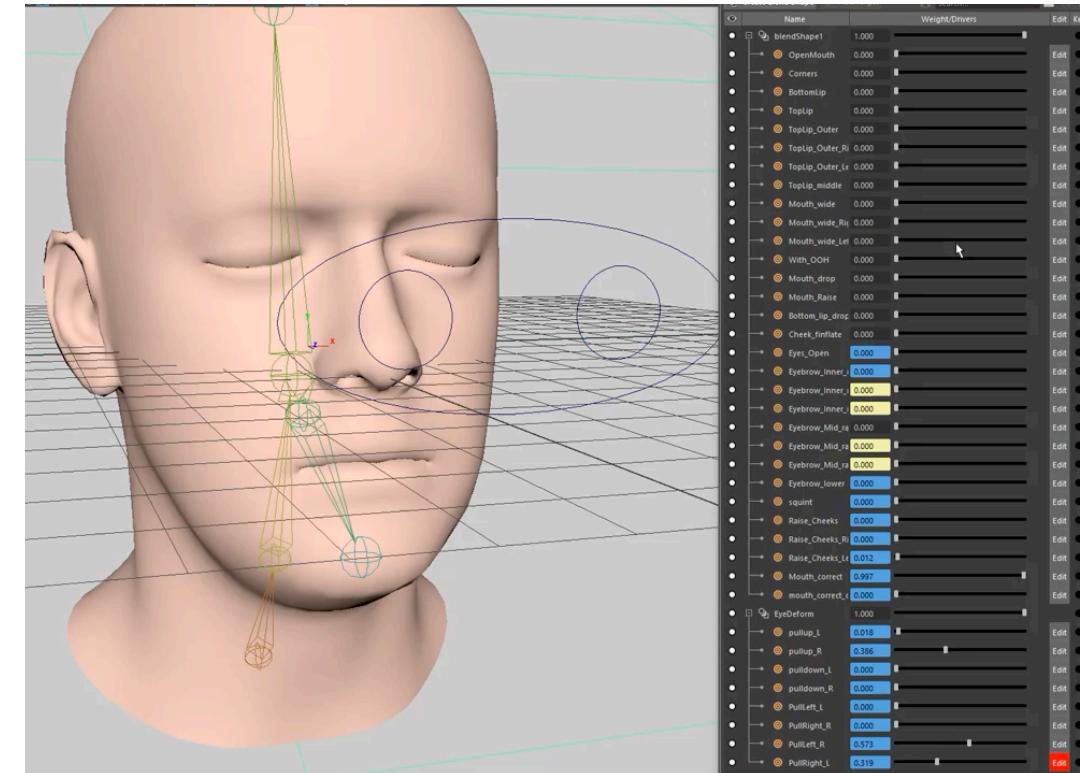
³Adobe Systems, Inc.

⁴ETH Zurich

This video contains narration

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

BlendShape



<https://www.youtube.com/watch?v=Cg6qBXs0xGU>

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