

コンピュータグラフィクス論

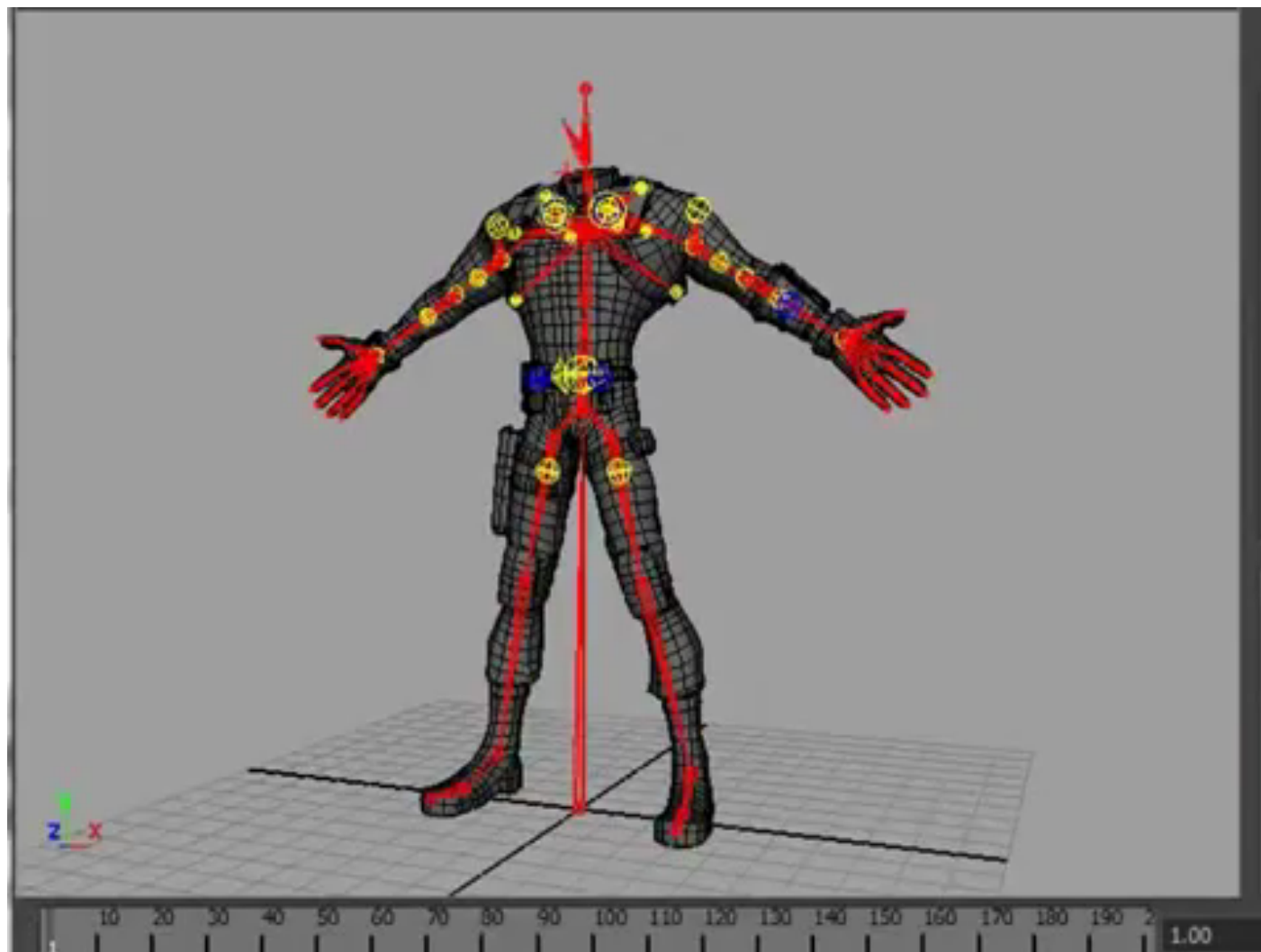
－アニメーション(1)－

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

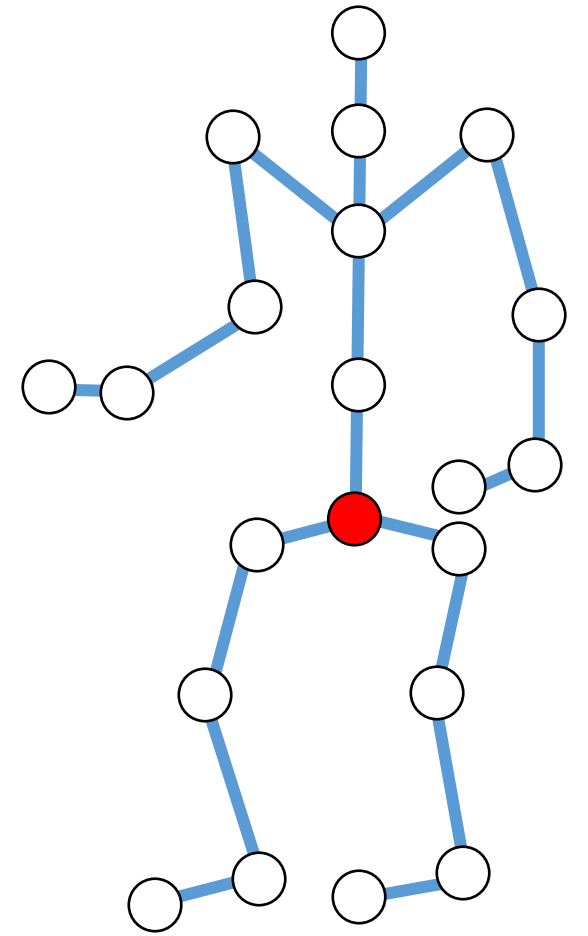
- 単純な仕組み
- 直感的な挙動
- 低い計算コスト



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

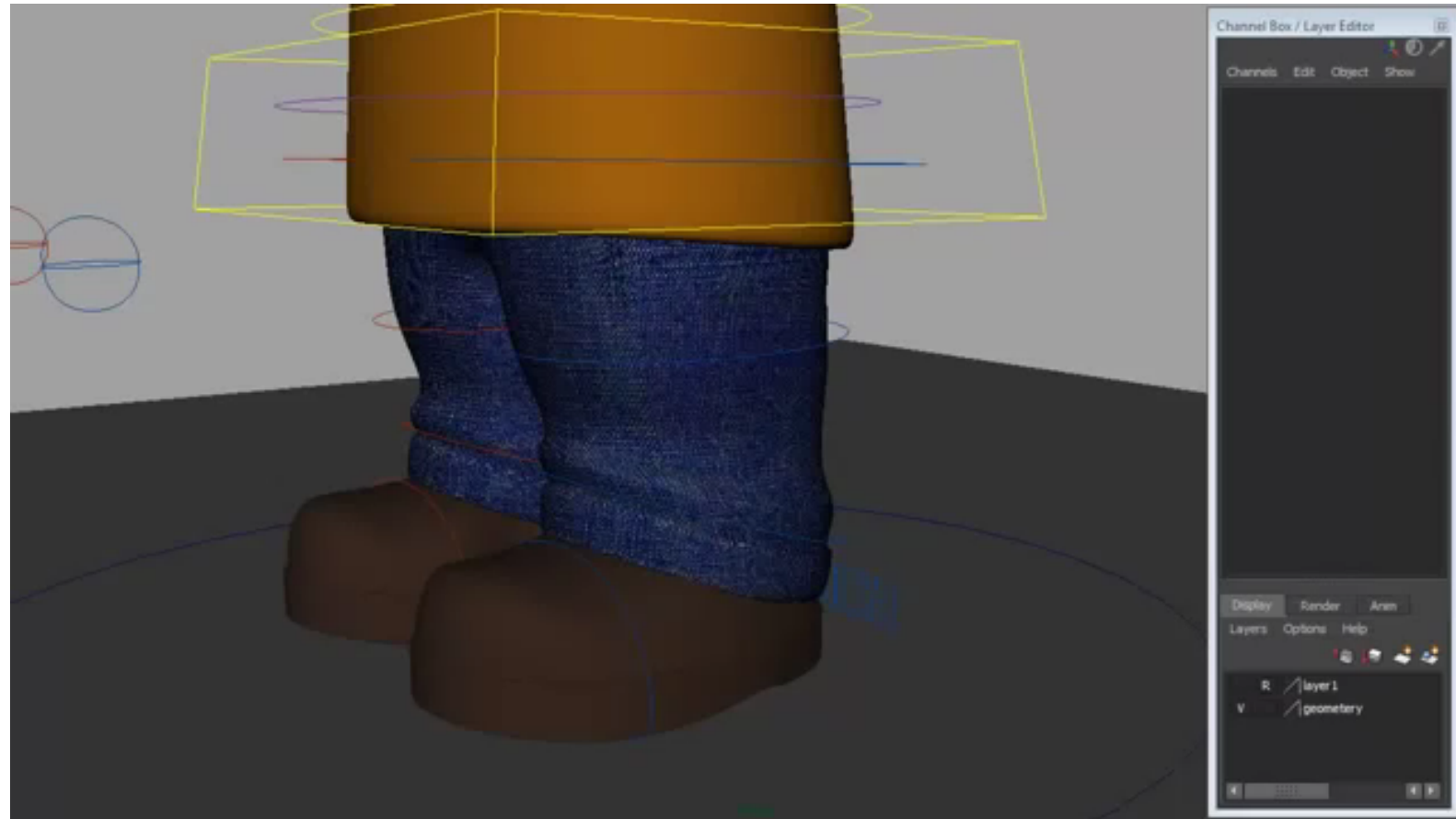
スケルトンによる姿勢の表現

- 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
(**F**orward **K**inematics)
- ロボティクス分野と深く関連



Inverse Kinematics

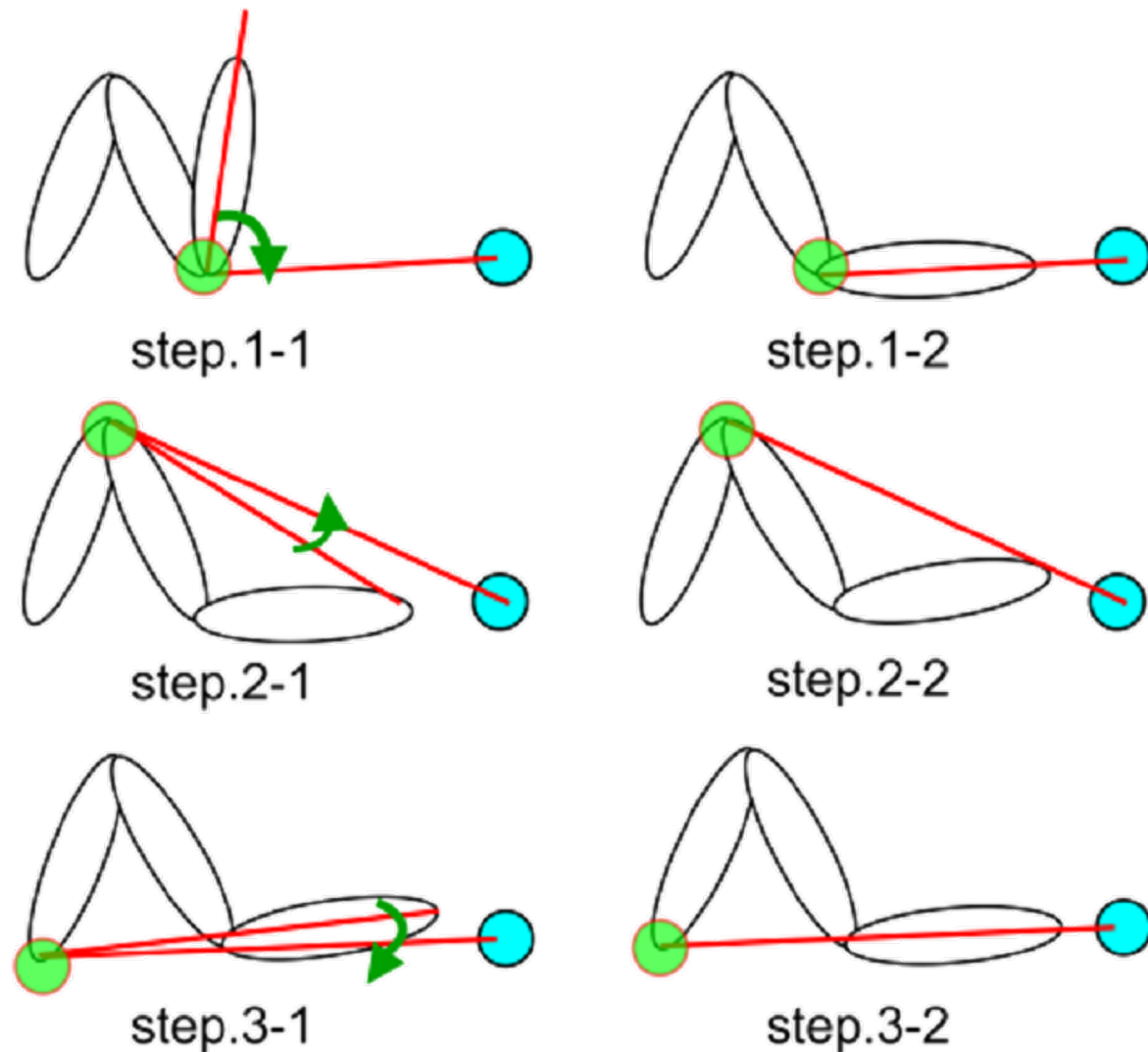
- 末端関節の位置を与えると、それを満たす関節角を逆算
- IK で手早く姿勢を作り、FK で微調整
- FKでポーズを再生し、IKで環境との接触を調整(接地など)



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.

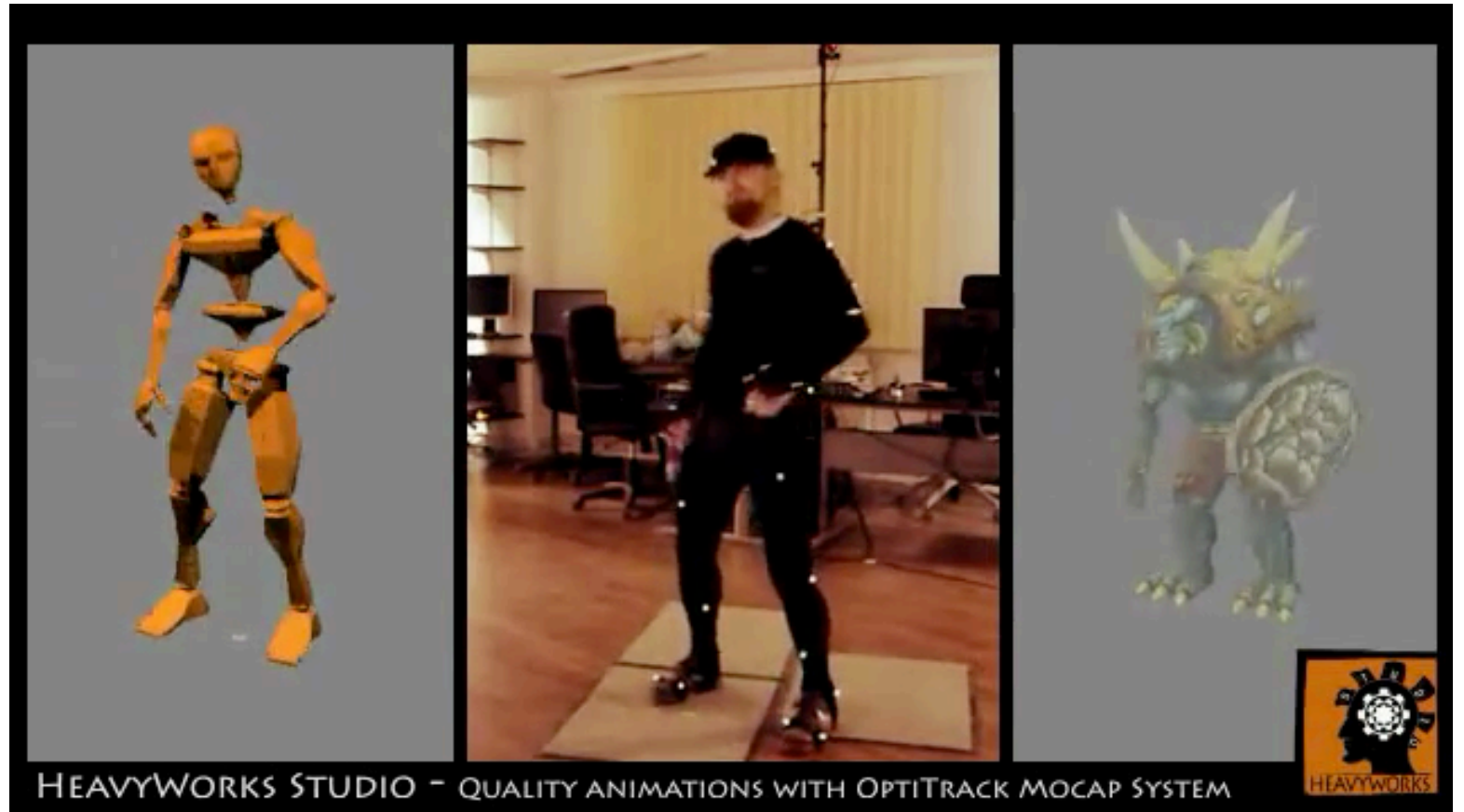
モーションデータの取得・生成方法

光学式モーションキャプチャ

- 役者にマーカールを取り付け、多数 (~48) のカメラで撮影

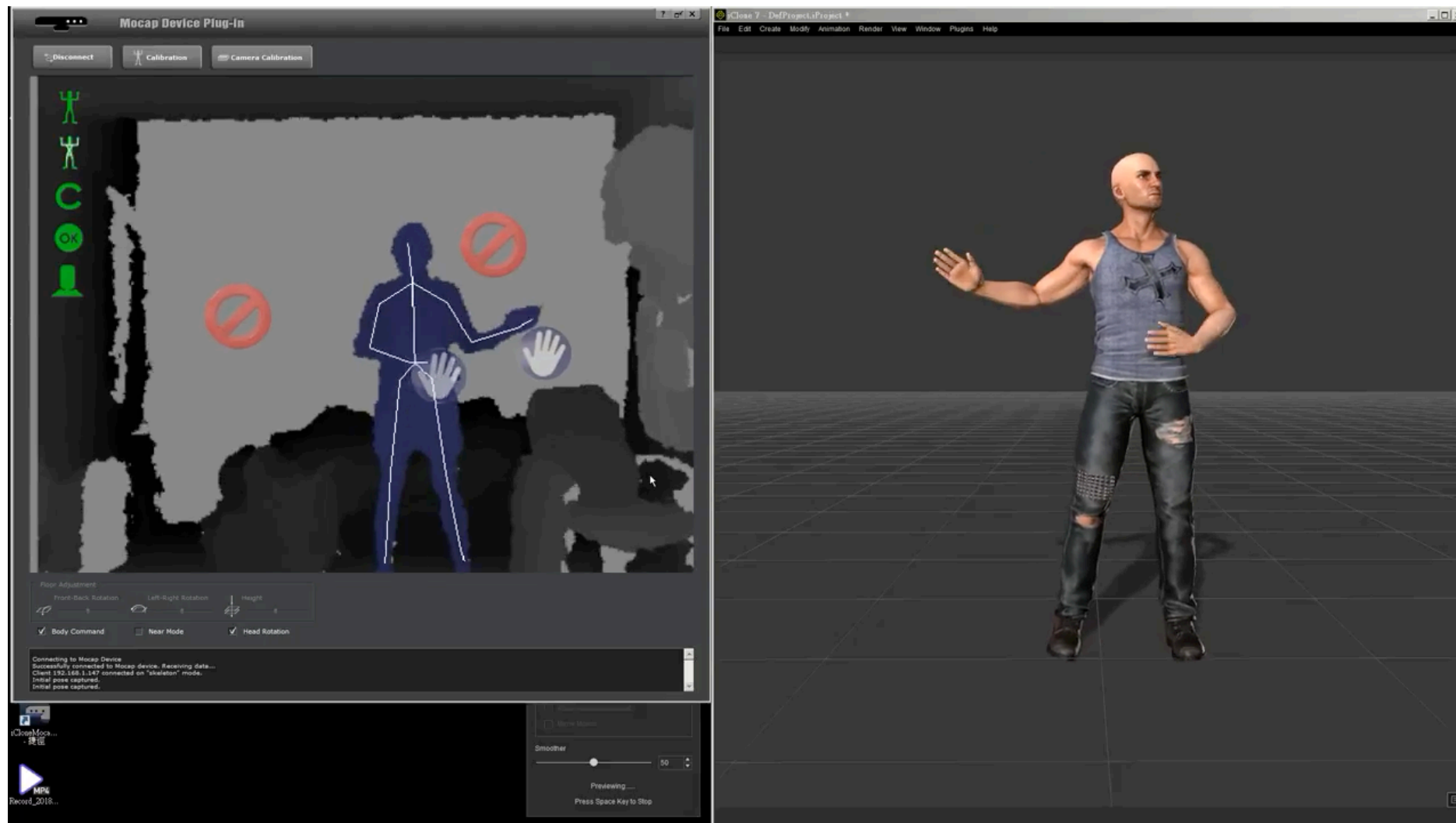


from Wikipedia



<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

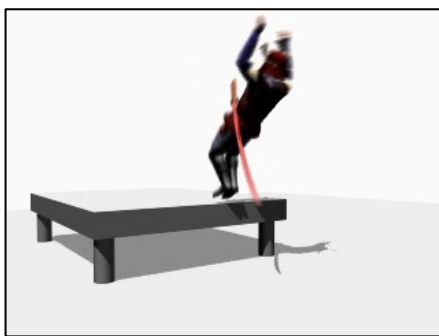
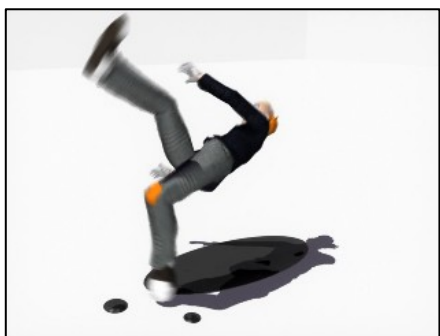
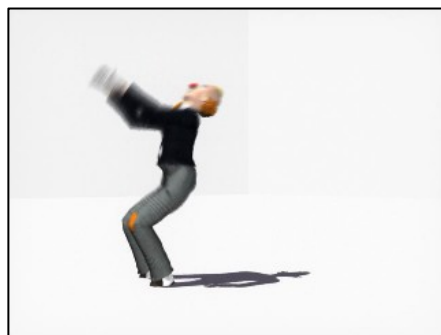
ACM SIGGRAPH Asia'18



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

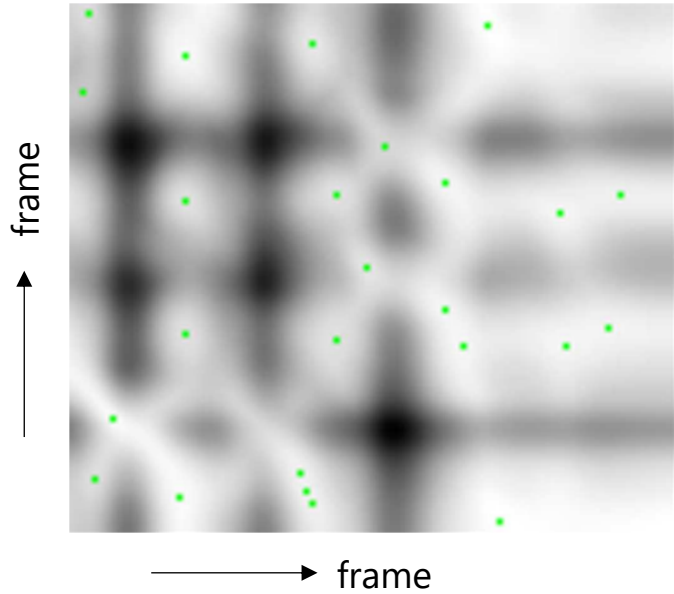
モーションデータベース

- <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)

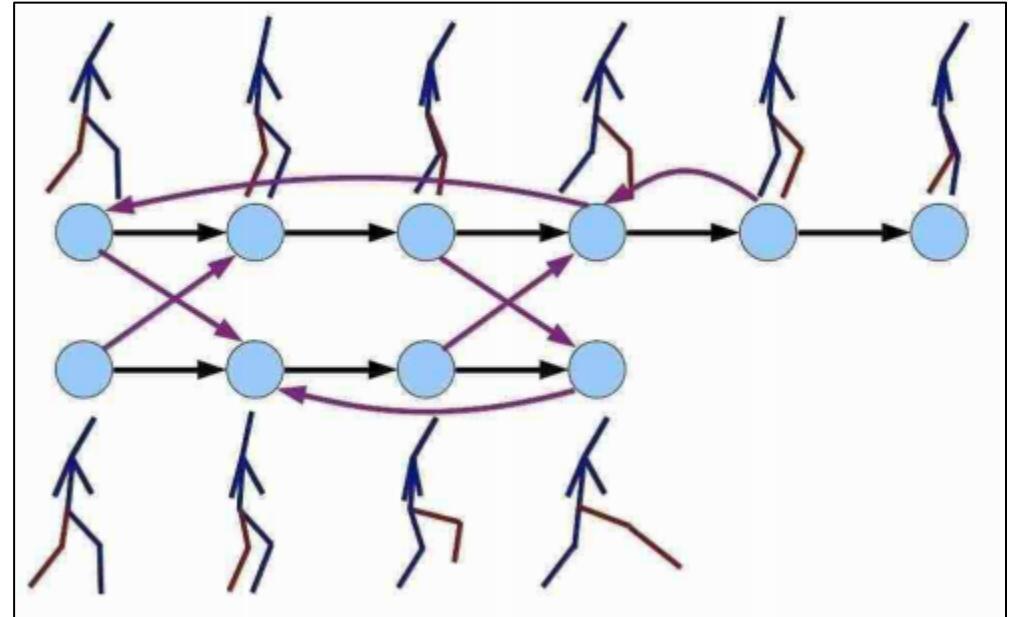
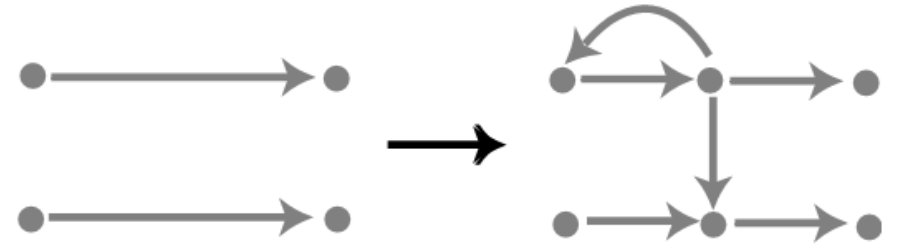


モーションの連結

- 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應できる

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

²GeorgiaTech Lorraine



This video contains narration

キャラクターの動きに関する様々なトピック

Keyframe animation
by
topology coordinates

複数キャラクターの
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)

Synthesis of Detailed Hand Manipulations
Using Contact Sampling

Yuting Ye C. Karen Liu
Georgia Institute of Technology

物体をつかむ動作

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

Aggregate Dynamics
for Dense Crowd Simulation

Submission 0042

群衆シミュレーション

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

Cost Functions

Path planning

<https://vimeo.com/33409868>

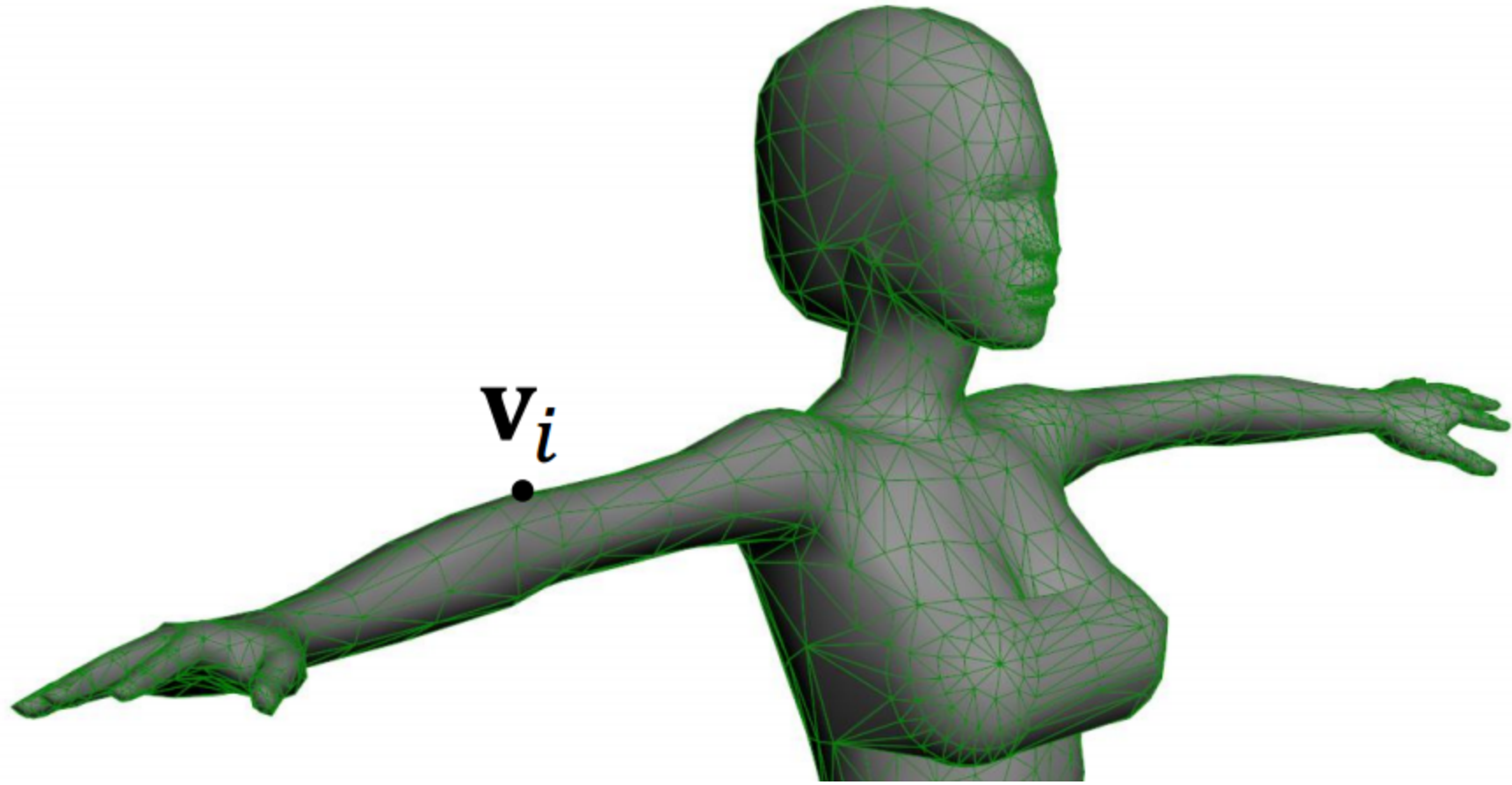
Character motion synthesis by topology coordinates [Ho EG09]

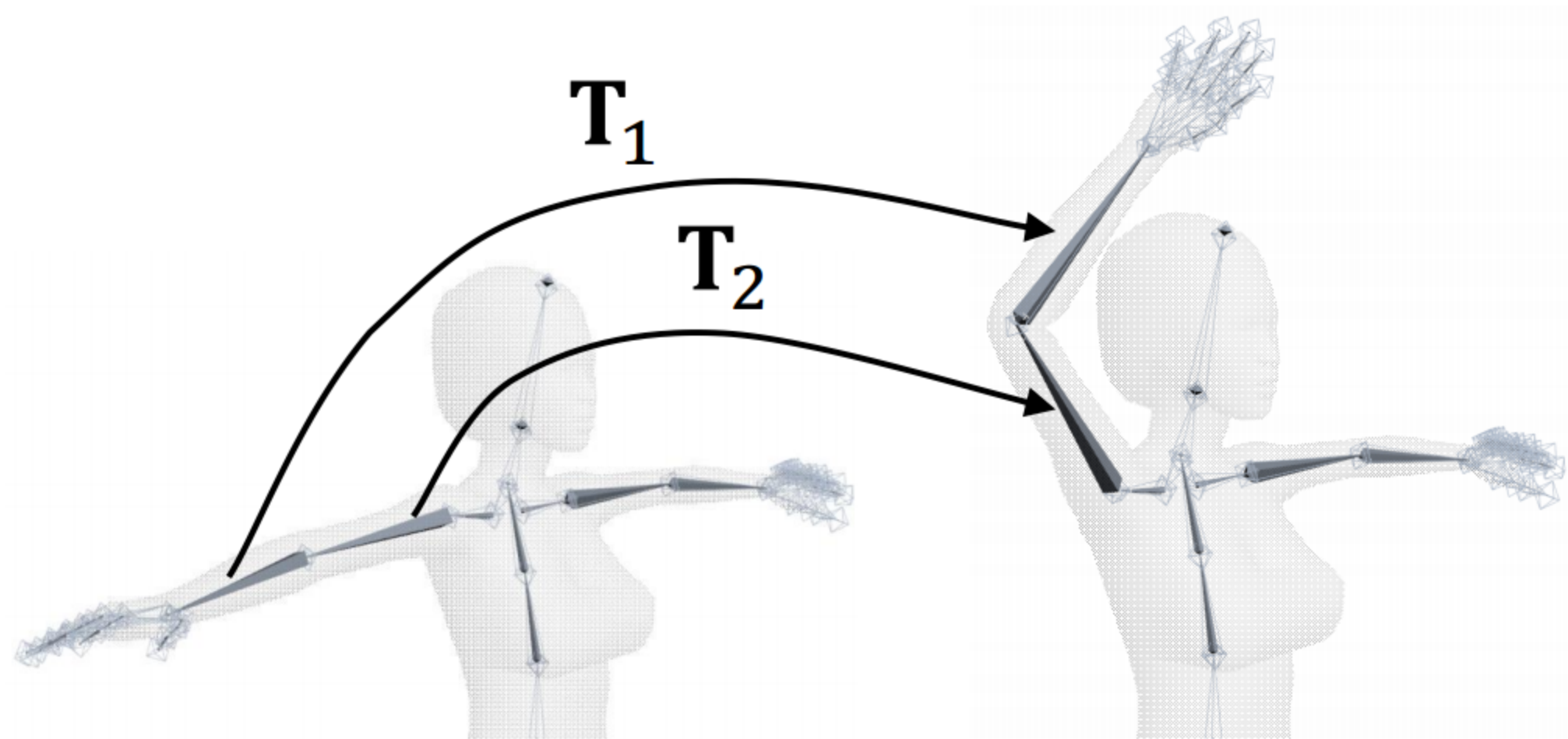
Aggregate Dynamics for Dense Crowd Simulation [Narain SIGGRAPHAsia09]

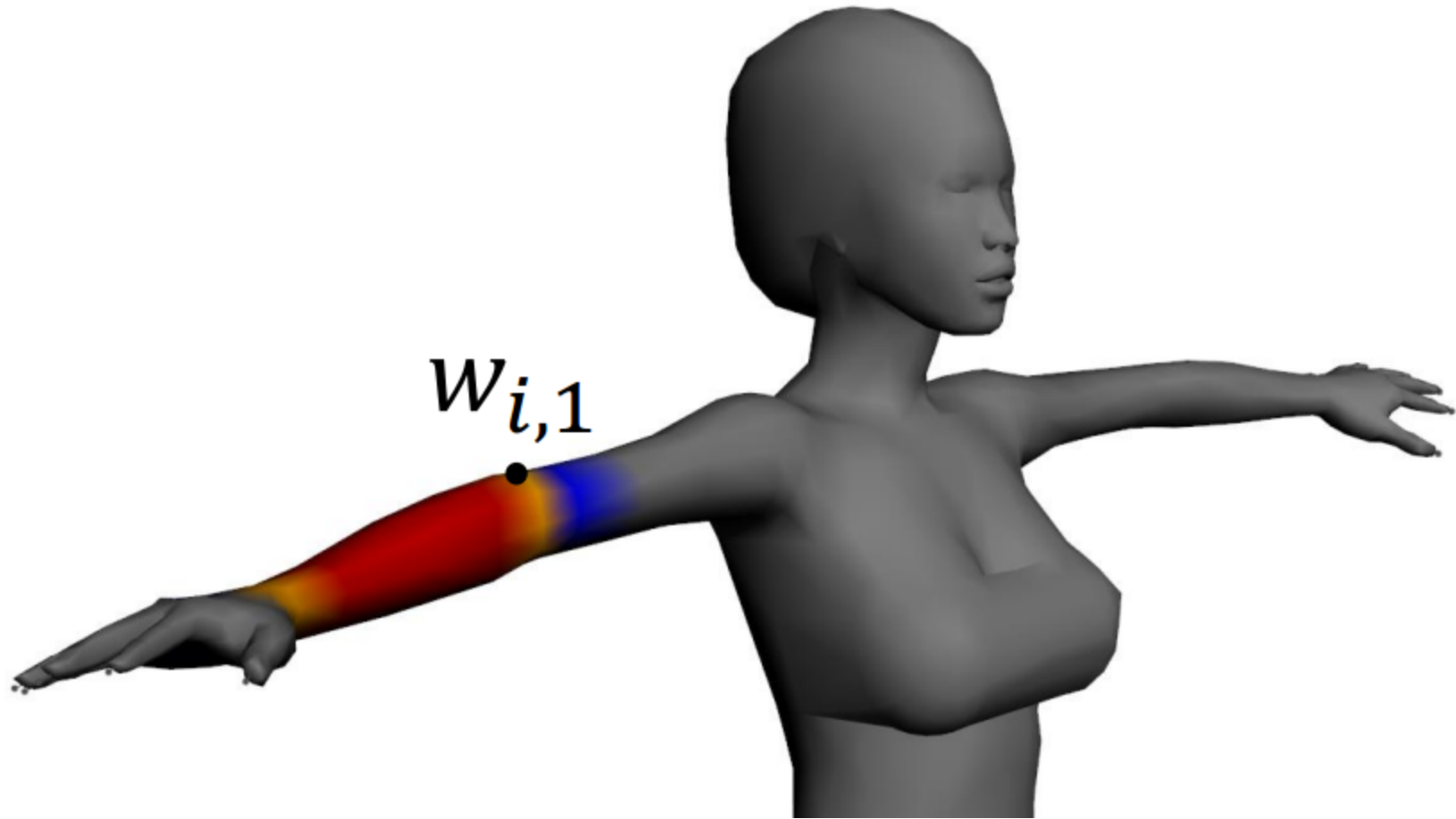
Synthesis of Detailed Hand Manipulations Using Contact Sampling [Ye SIGGRAPH12]

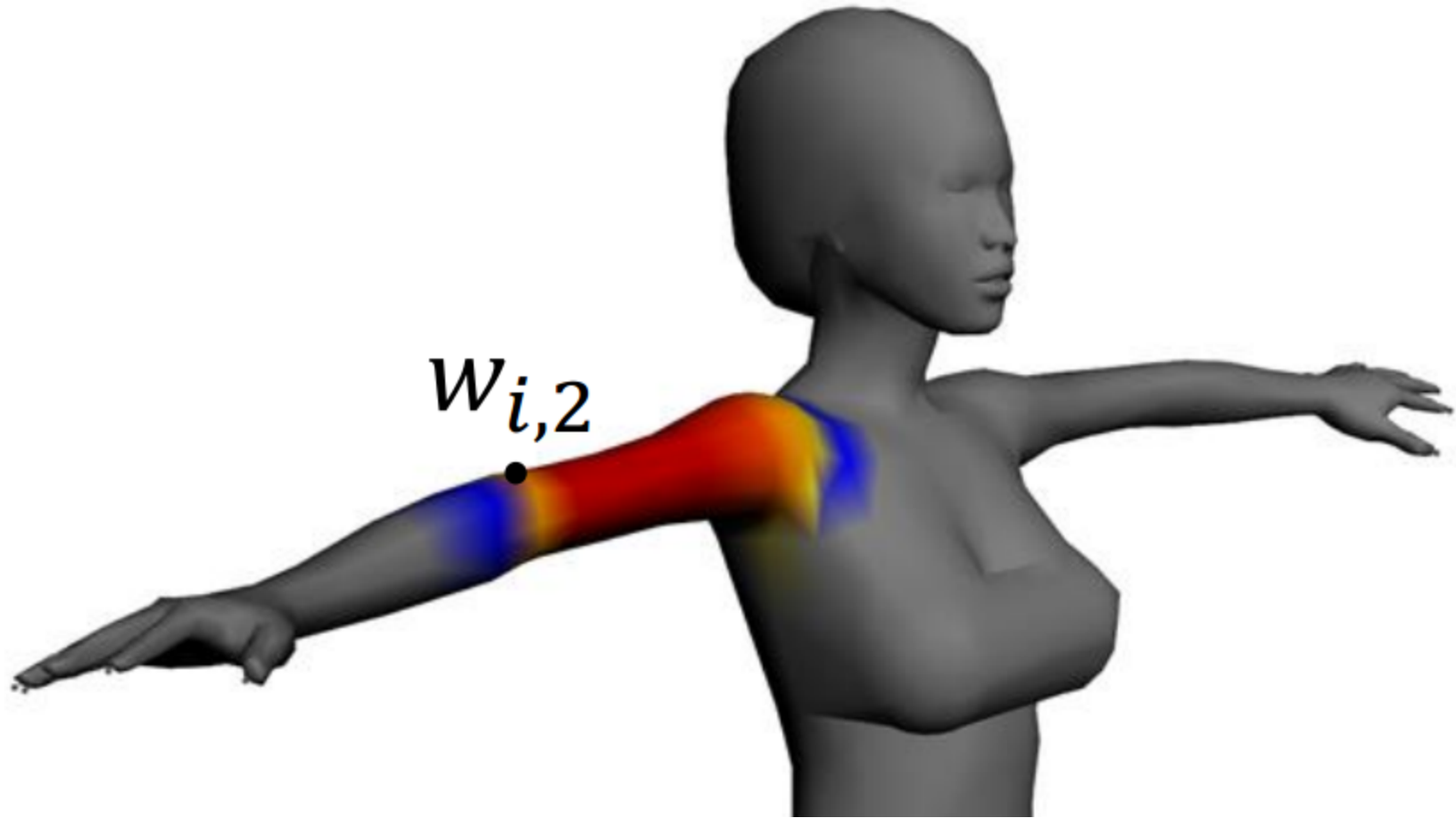
Space-Time Planning with Parameterized Locomotion Controllers.[Levine TOG11]

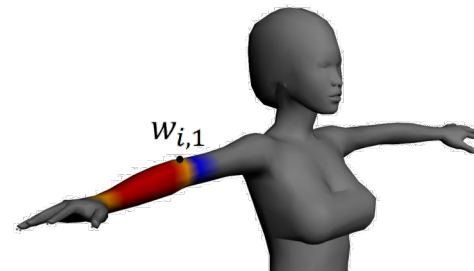
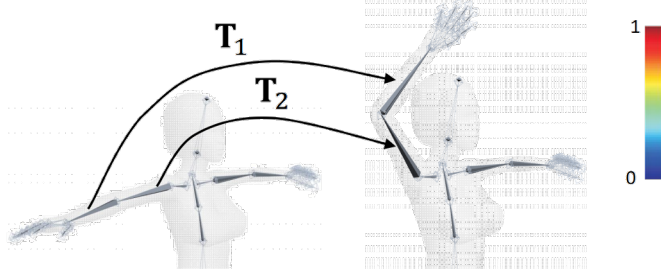
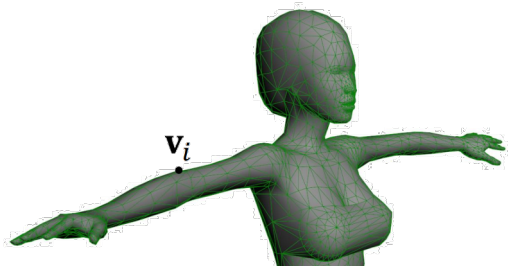
スキニング











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

- 入力

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

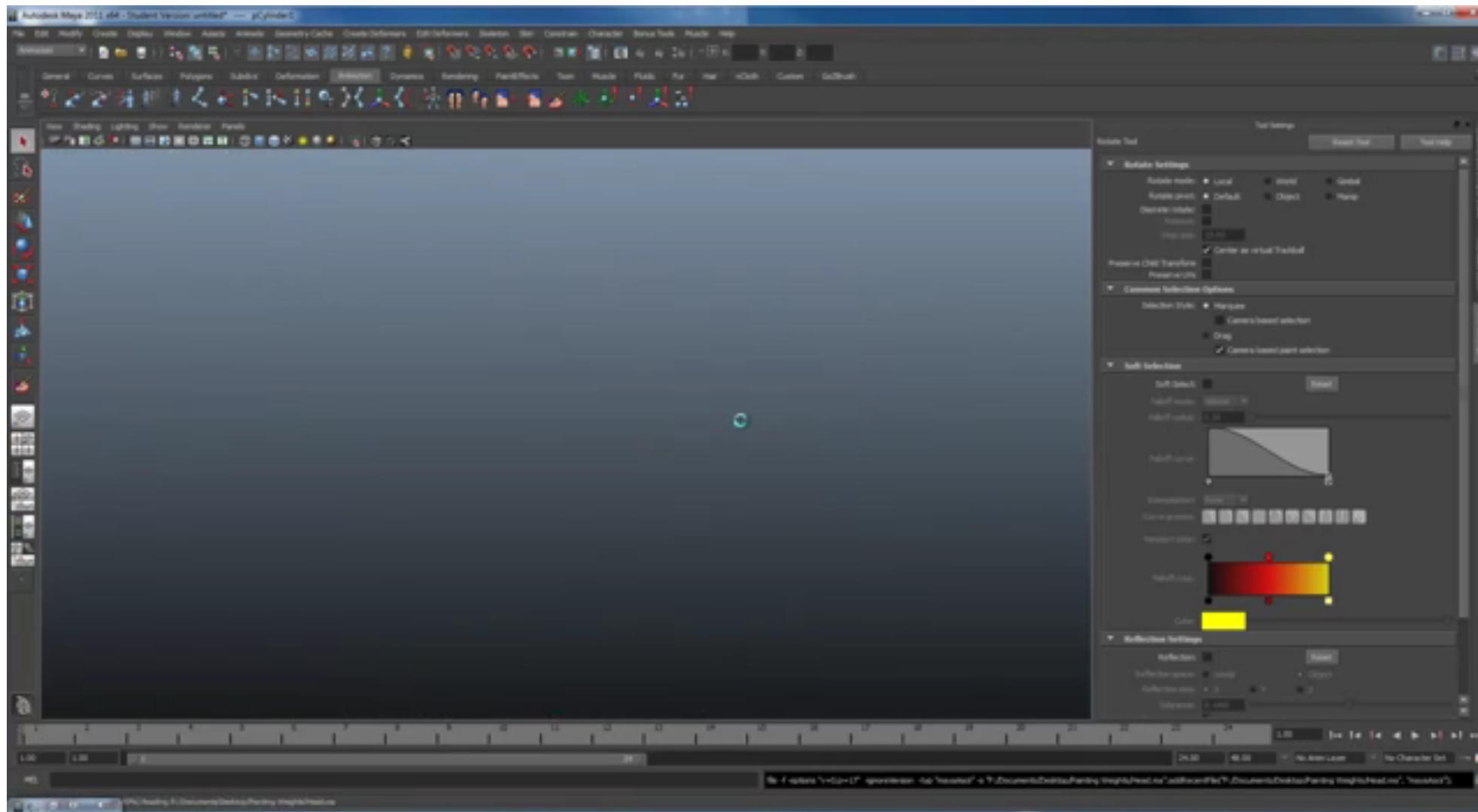
- 出力

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

- 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

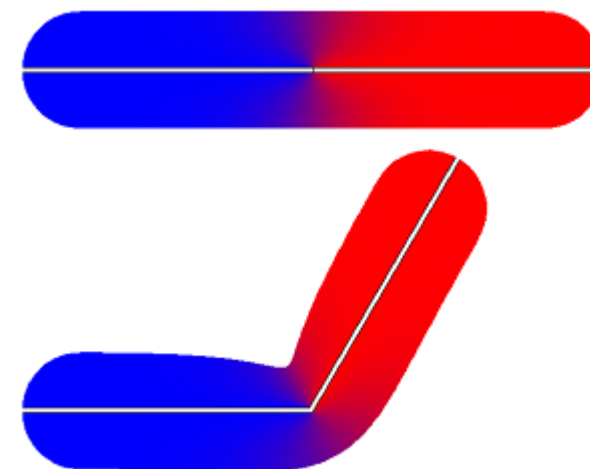


<https://www.youtube.com/watch?v=mfEP8BIXTgQ>

重みの与え方：自動計算

- j 番目のボーンのリグの重み 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

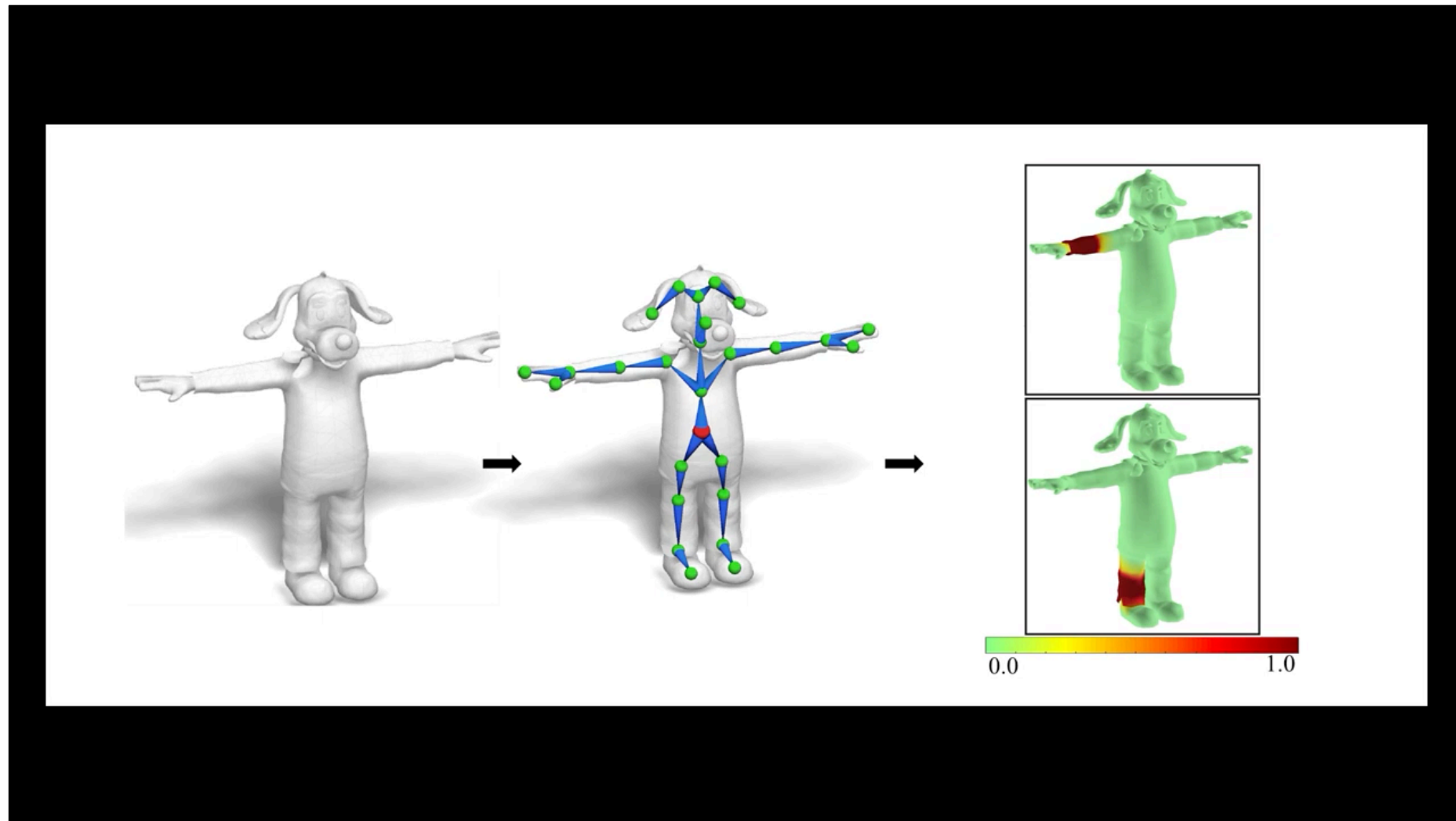
- 一階微分 $\int_{\Omega} \|\nabla w_j\|^2 dA$ を最小化 [Baran 07]
 - サーフェス上で近似的に解く → 簡単、高速
- 二階微分 $\int_{\Omega} (\Delta w_j)^2 dA$ を最小化 [Jacobson 11]
 - 不等式制約 $0 \leq w_j \leq 1$ も導入
 - ボリューム上で二次計画問題を解く → 高品質



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>

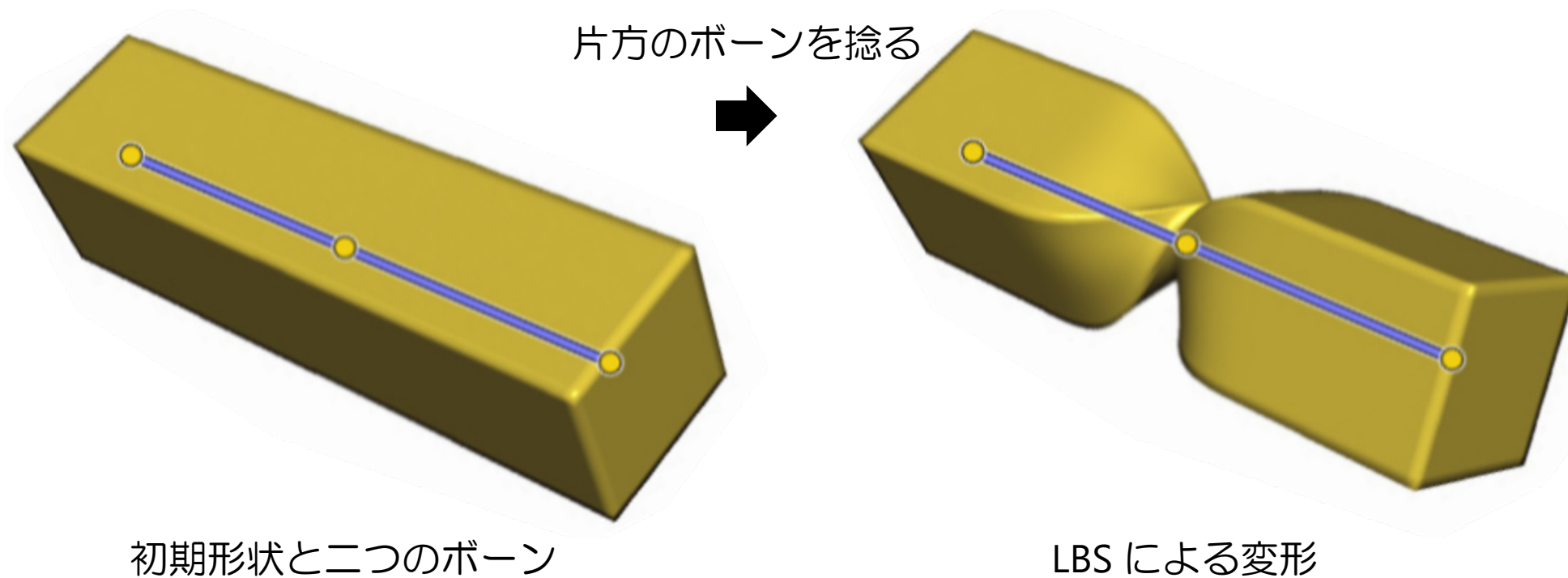
変換の混合手法：Linear Blend Skinning

- 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

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

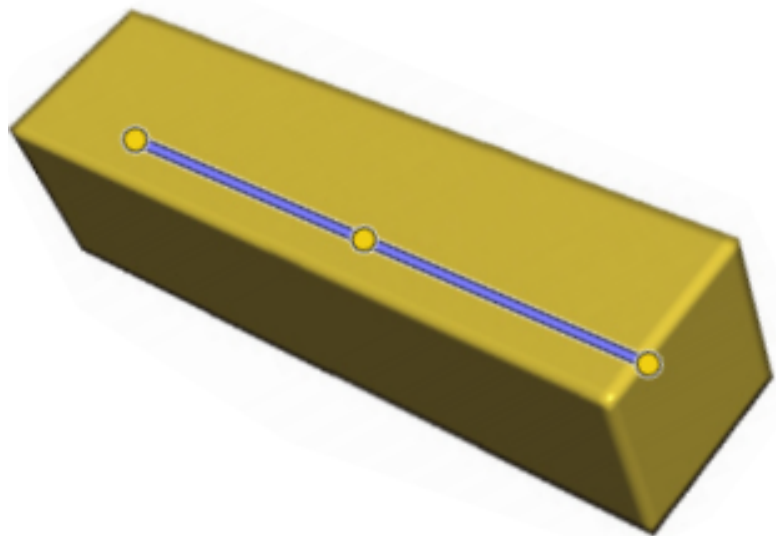
- 単純で高速
 - 頂点シェーダで実装：フレーム毎に $\{\mathbf{v}'_i\}$ を GPU に送るのではなく、初期化時に $\{\mathbf{v}_i\}$ と $\{w_{i,j}\}$ を送り、フレーム毎に $\{\mathbf{T}_j\}$ を送る
- 業界で最も一般的

LBS の欠陥：“candy wrapper” effect

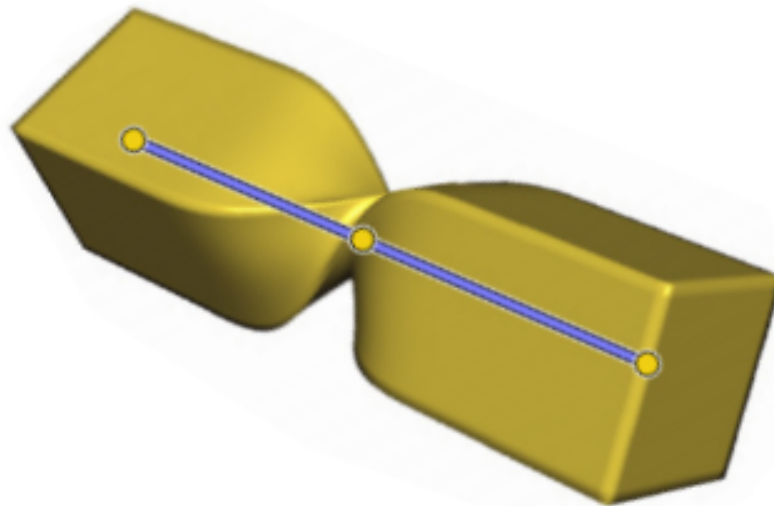


- 剛体変換の線形和は剛体変換にならない！
 - 180度捻ると関節の周りが一点に凝縮

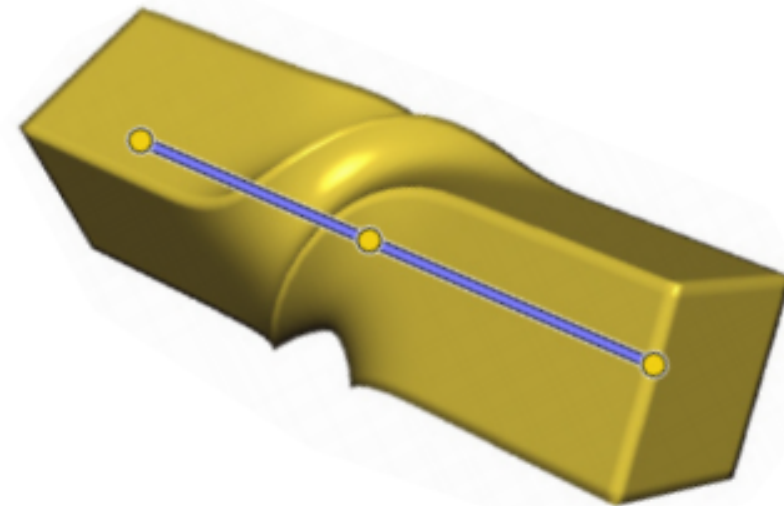
LBS に代わる手法：Dual Quaternion Skinning



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) \rightarrow 3D 回転変換
- Dual quaternion (二つの quaternion) \rightarrow 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：
$$\hat{a} := a_0 + \varepsilon a_\varepsilon$$
$$a_0, a_\varepsilon \in \mathbb{R}$$
- 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
$$\hat{\mathbf{q}} := \mathbf{q}_0 + \varepsilon \mathbf{q}_\varepsilon$$
- 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 $\frac{1}{\hat{a}} = \frac{1}{a_0} - \varepsilon \frac{a_\varepsilon}{a_0^2}$

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

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 :

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

- \vec{v}' が変換後の3D座標

Dual quaternion による剛体変換

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

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

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

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

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

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

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

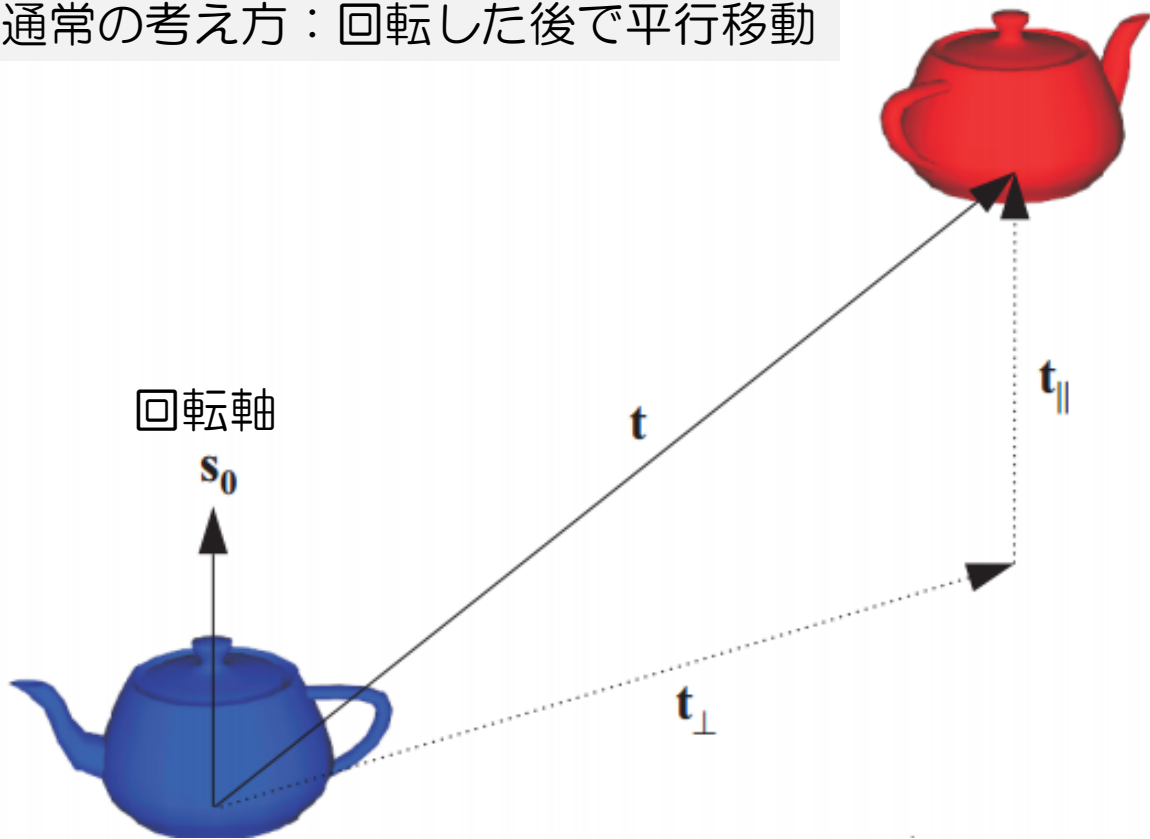
$$= \mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^* + \frac{\varepsilon}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^* + \varepsilon\mathbf{q}_0\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^* + \cancel{\frac{\varepsilon^2}{2}\vec{\mathbf{t}}\mathbf{q}_0\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^*} + \frac{\varepsilon}{2}\mathbf{q}_0\mathbf{q}_0^*\vec{\mathbf{t}}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

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

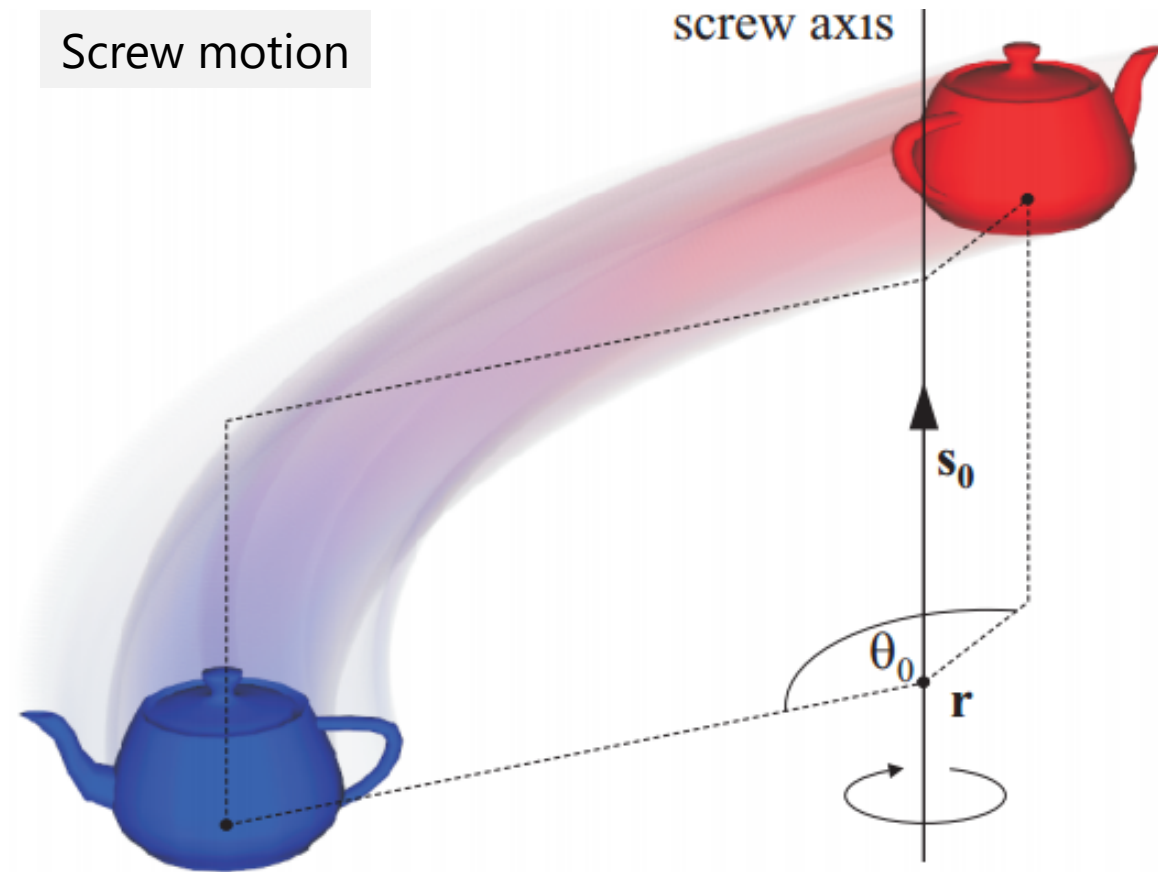
$$= 1 + \varepsilon(\vec{\mathbf{t}} + \mathbf{q}_0\vec{\mathbf{v}}\mathbf{q}_0^*) \quad \text{3D座標 } \vec{\mathbf{v}} \text{ を quaternion } \mathbf{q}_0 \text{ で回転した結果}$$

“Screw motion” としての剛体運動

通常の方：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

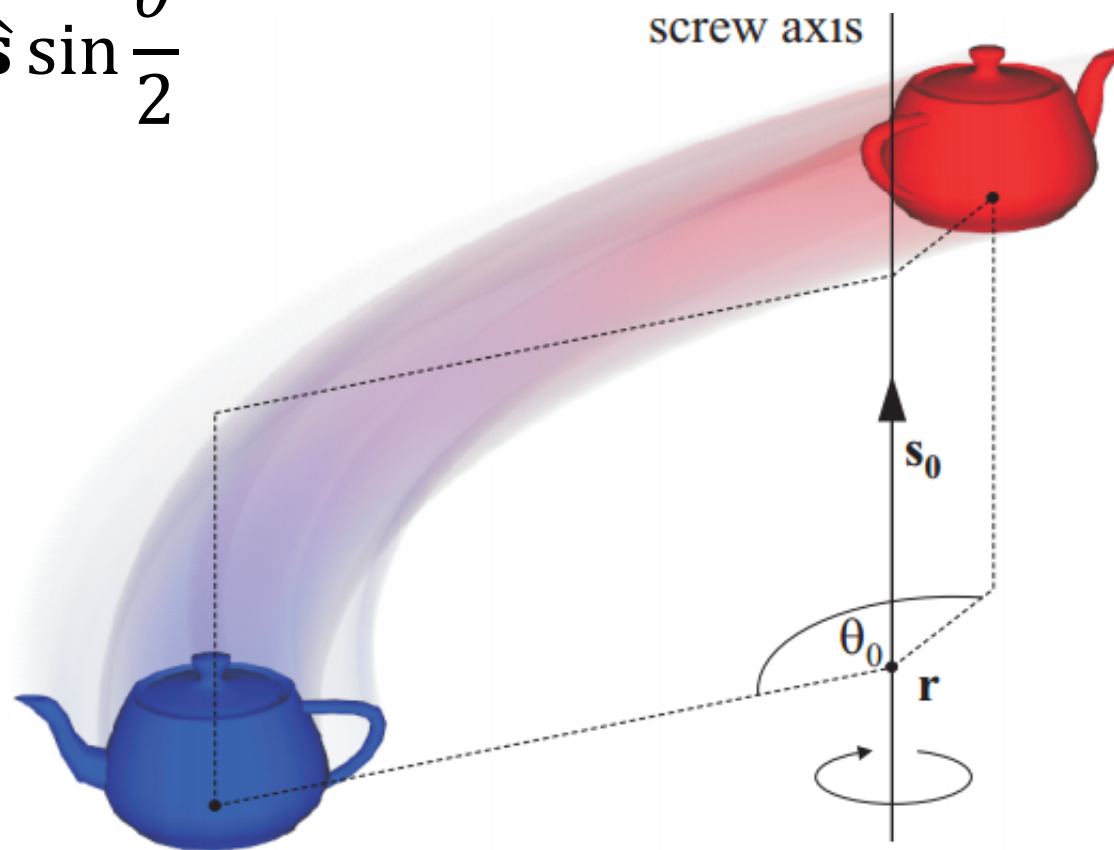
- 単位 dual quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ は、以下の形で表せる：

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

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



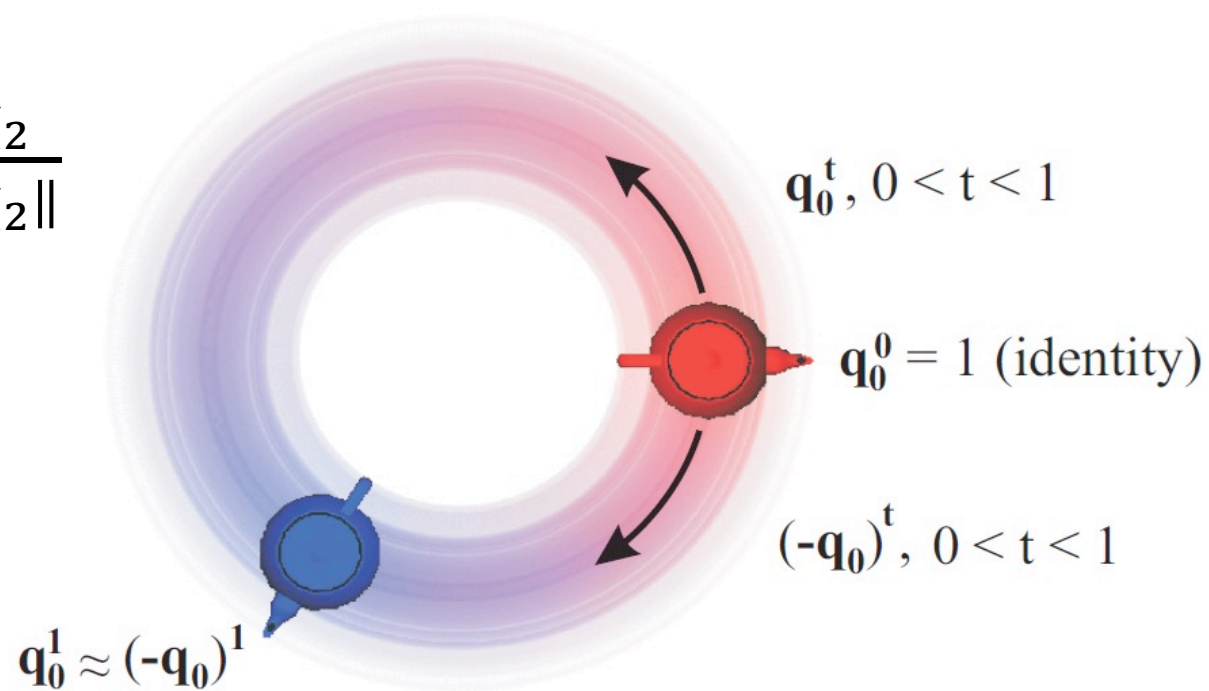
二つの剛体変換の補間

- 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



Dual quaternion による剛体変換のブレンド

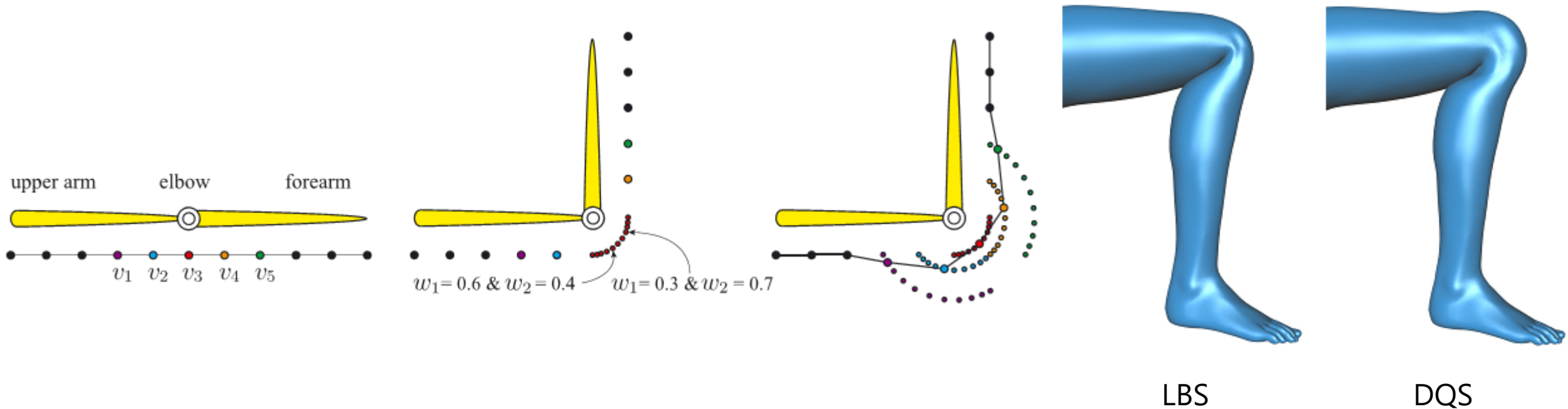
$$\text{blend}(\langle w_1, \hat{\mathbf{q}}_1 \rangle, \langle w_2, \hat{\mathbf{q}}_2 \rangle, \dots) := \frac{w_1 \hat{\mathbf{q}}_1 + w_2 \hat{\mathbf{q}}_2 + \dots}{\|w_1 \hat{\mathbf{q}}_1 + w_2 \hat{\mathbf{q}}_2 + \dots\|}$$

- 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

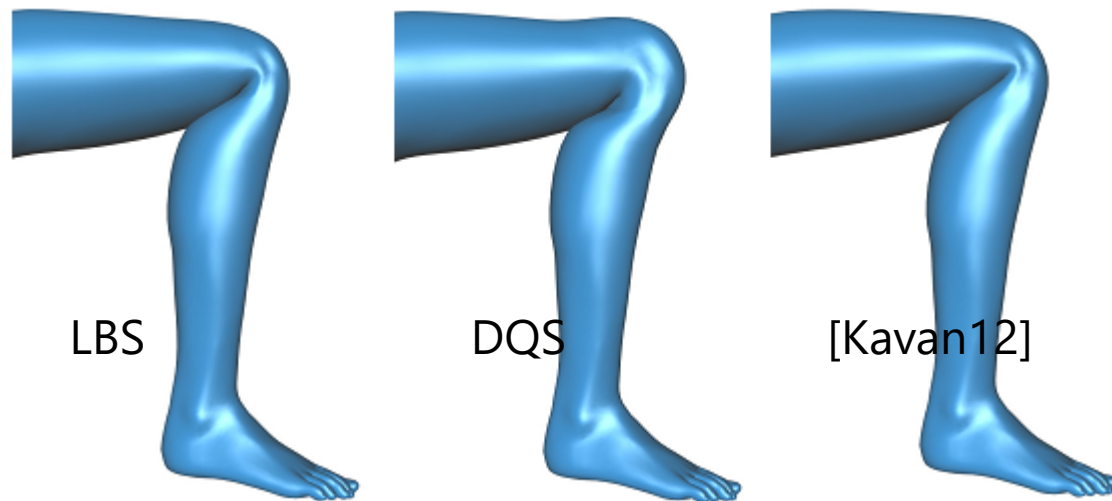


DQS の欠点：“bulging” effect

- 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



DQS の欠点の克服

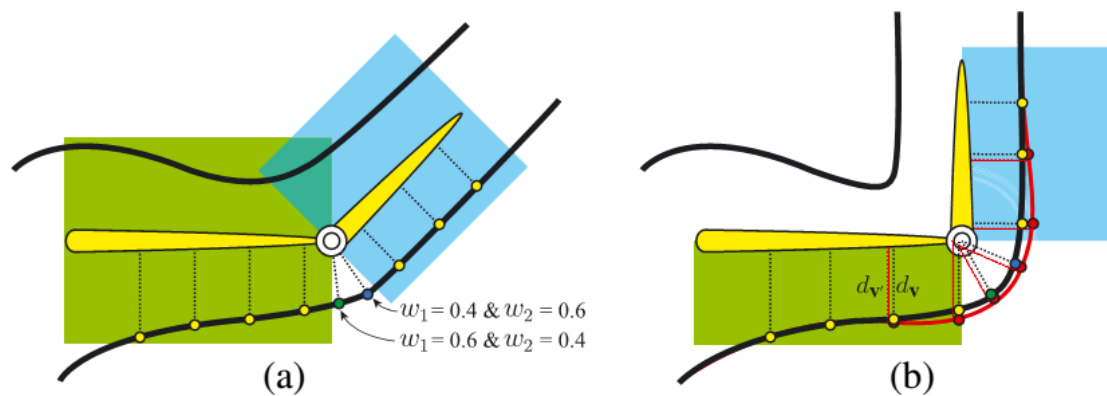


LBS

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]

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フェース

点、ケージ、スケルトンの統合 [Jacobson 11]

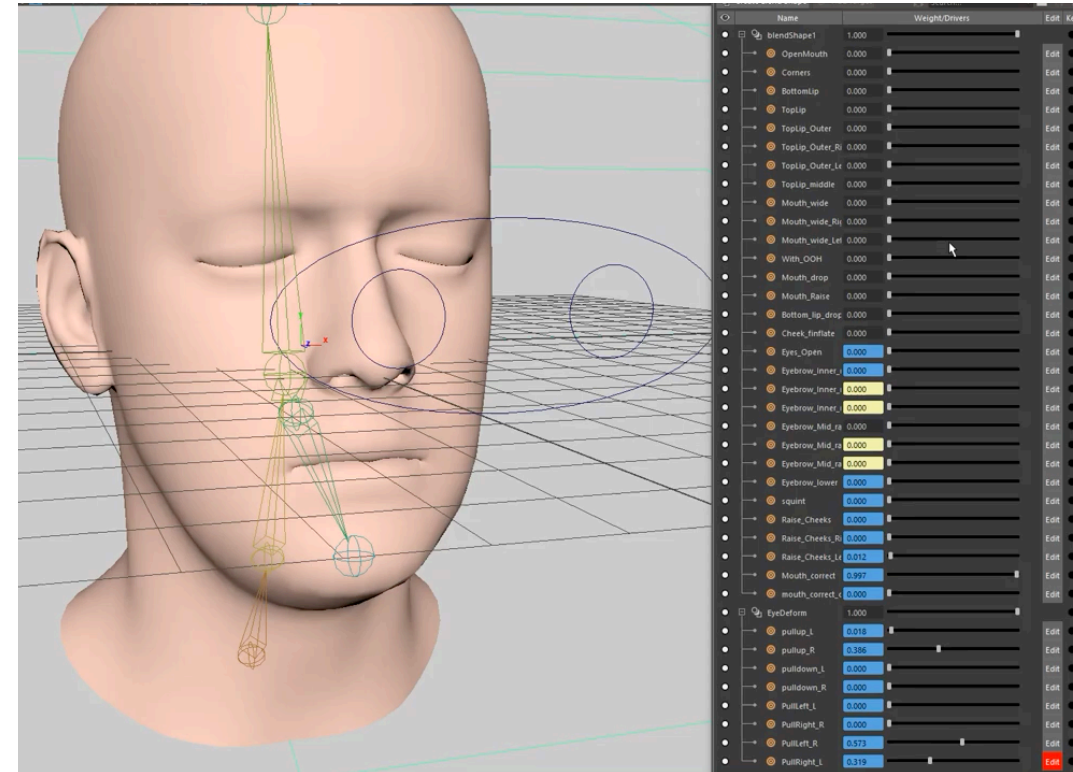
BlendShape

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=P9fqm8vvgdB8>

<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