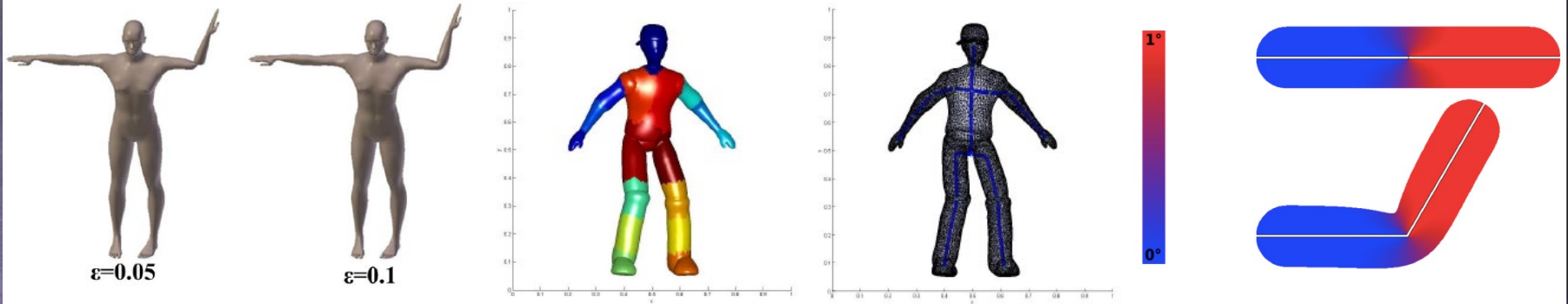




# Comparison of Skinning Weight Derivation Methods of Digital Human Model



정성욱, 정하영, 홍영기, 유희천

포항공과대학교 산업경영공학과

2019년 추계학술대회

---

# Contents

---

1. 연구 배경
2. 연구 목적
3. Skinning Weight Calculation
  - 문헌 조사 방법
  - Example pose based method
  - Mathematical model based method
  - 토 의

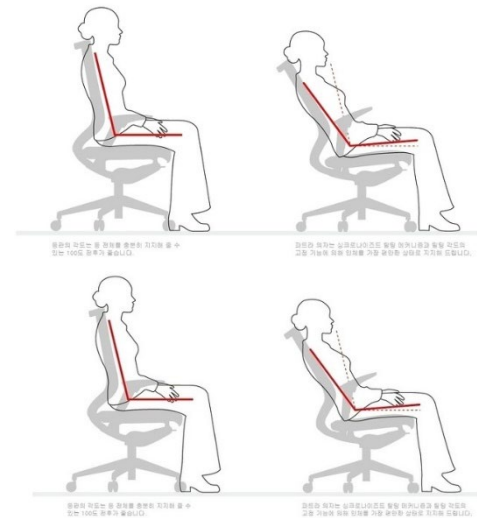
# Digital Human Model과 인간공학적 제품 설계

- 사용자의 **사용 편의성 및 조작성을 고려하지 않은 제품은 사용자에게 불편함, 부상 위험** 등을 줄 수 있음
- **Digital human model** 기술이 인간공학적 제품 설계를 위한 인체 형상 분석, 인체 변수 측정 등에 활용될 수 있음

Normal Mouse



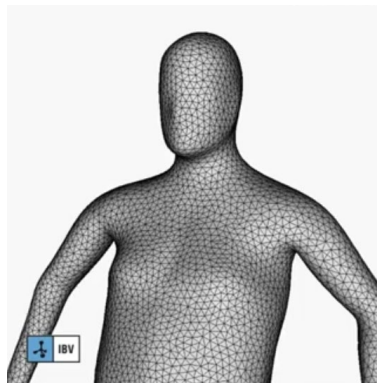
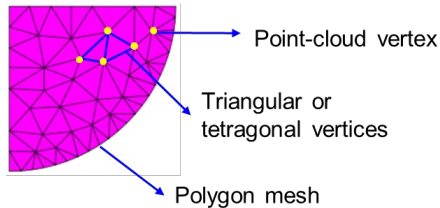
Vertical Mouse



# Digital Human Model 구성 요소

- Surface mesh: model의 표면을 이루는 점들의 집합
- Skeleton & joint: 인체 형상 및 자세를 고려한 skeleton link
- Landmark: 효율적인 인체 치수 측정을 위한 기준점
- Skinning weight: 뼈의 위치 변화에 따른 각 mesh point의 위치 변화 정도

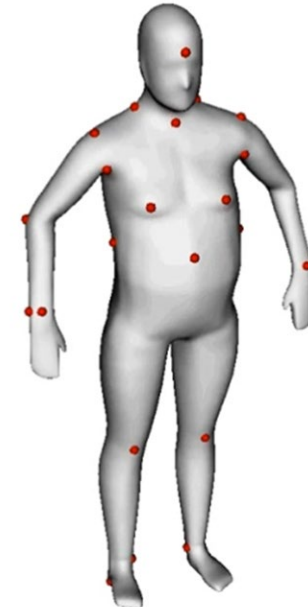
## Surface mesh 예시



## Skeleton 예시

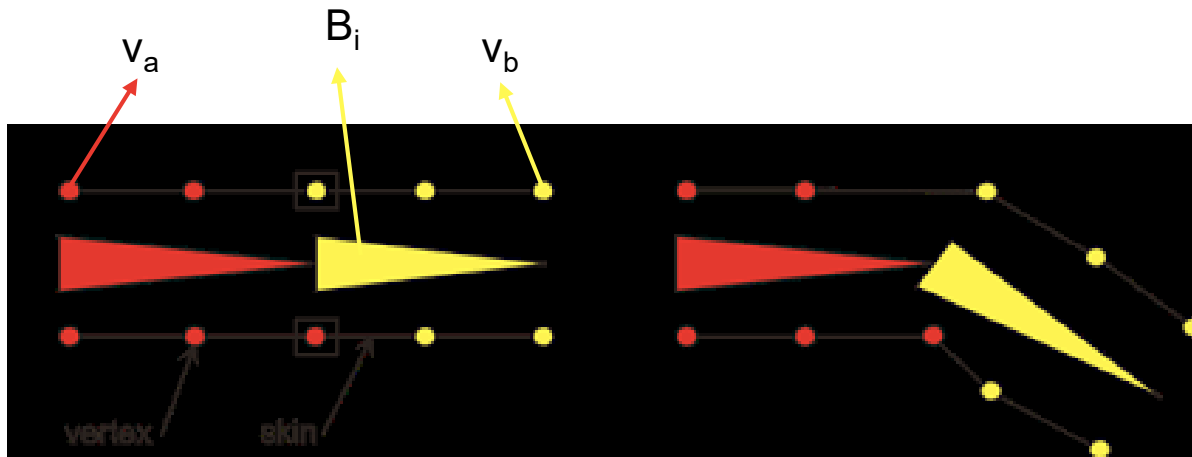


## Landmark 예시



# Skinning Weight

- Digital human model의 pose를 변형할 때 skinning weight가 중요
- Model의 skinning weight가 적절해야 자세를 변형시켜도 실제 인체 형상과 유사함
- Skinning weight란 각 뼈의 위치 변화에 각 mesh point의 위치가 변하는 정도
  - Skinning weight는 뼈의 영향력에 따라 0과 1 사이의 값을 가짐
  - Human model의 한 점  $v_a$ 의 위치는 뼈  $B_i$ 가 움직여도 변하지 않으면  $v_a$ 와  $B_i$ 의 skinning weight  $w_{a,i} = 0$  이 된다.
  - 반대로, 한 점  $v_b$ 의 위치가 뼈  $B_i$ 가 변하는 만큼 그대로 변한다면  $w_{b,i} = 1$ 이다.



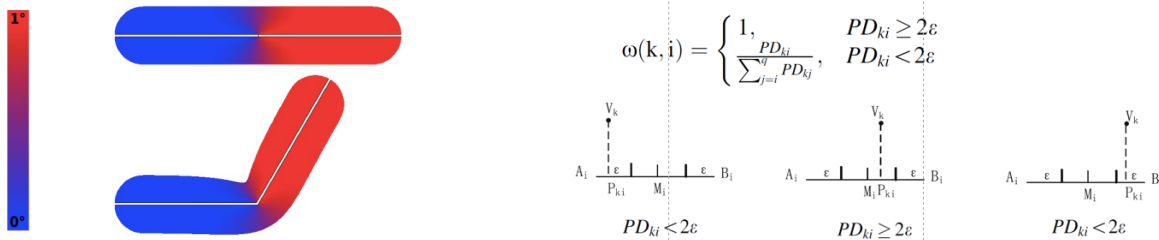
# 기존 연구의 한계

- 기존에 digital model을 구성할 때, skinning weight를 계산하지 않고 artists의 감각에 의지해 'painting'하는 경우가 많음
- Skinning weight를 계산하는 방법들이 존재하지만, 이들을 체계적으로 비교 분석한 사례가 없음
- 해당 분야가 주로 computer vision 분야에서 다뤄지기 때문에 인간공학적 관점에서 분석 및 유효성을 검증할 필요가 있음

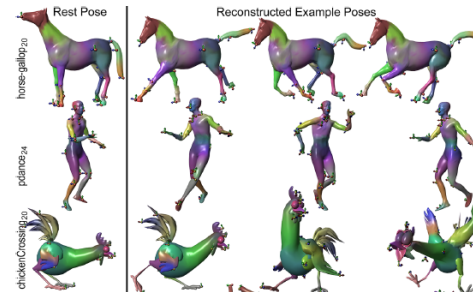
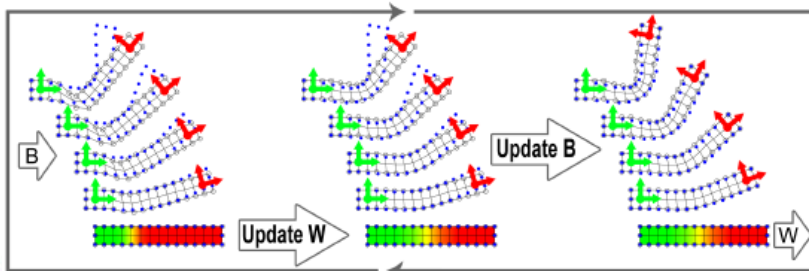
Weight paint map 추가

## Digital Human Model 구성 시 활용되는 Skinning Weight 도출 방법 문헌 조사

- Mathematical model based weight calculation



- Example pose based weight calculation



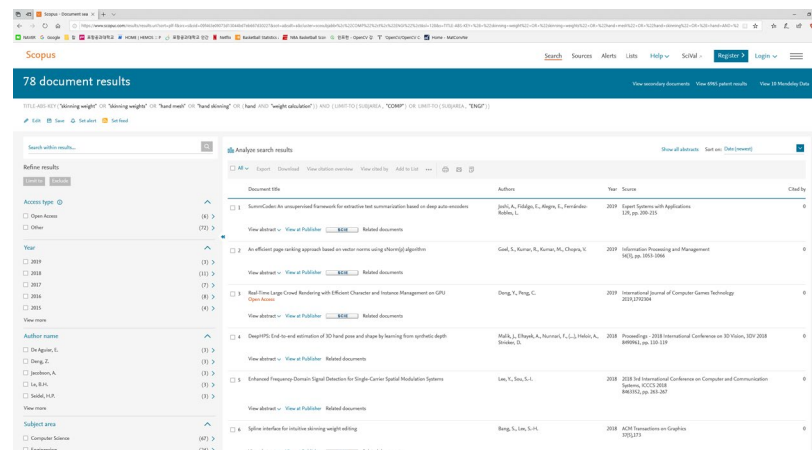


# 문헌 조사 방법

- ❑ 문헌 조사 site: [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- ❑ 검색 조건: title, abstract, keyword
- ❑ 검색 keyword
  - ✓ Skinning weight
  - ✓ Hand mesh
  - ✓ Hand skinning
  - ✓ Hand weight calculation

※ 검색식

TITLE-ABS-KEY ( "skinning weight" OR "skinning weights" OR "hand mesh" OR "hand skinning" OR ( hand AND "weight calculation" ) )





# 선별 절차

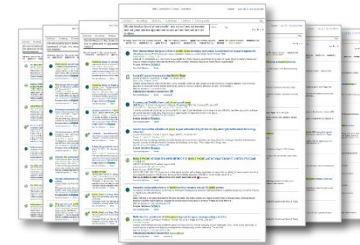
S1. **Keywords 조합**을 통한 journal paper 검색

TITLE-ABS-KEY ( "skinning weight" OR "skinning weights" OR "hand mesh" OR "hand skinning" OR ( hand AND "weight calculation" ) )

78 건



S2. **Title screening**을 통한 1차 선별



35 건



S3. **Abstract screening**을 통한 2차 선별



32 건



S4. 입수된 full paper에 대한 **관련도 평가**

상: 14건, 중: 6건, 하: 11건

31 건



S5. 관련도에 따라 **최종 review 대상 논문** 선별

상: 14건, 중: 6건, 추가 2건

22건

# 문헌 조사 결과 : Summary

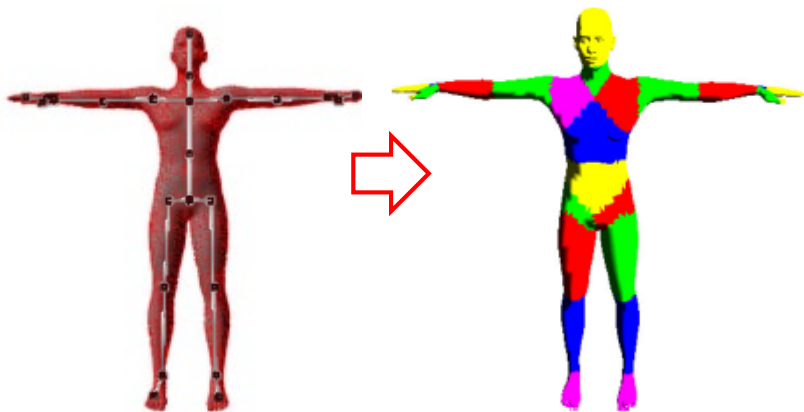
- 선별된 문헌들의 weight 도출 방식(example pose based, mathematical model based), algorithm 등을 review함

Summary table 추가

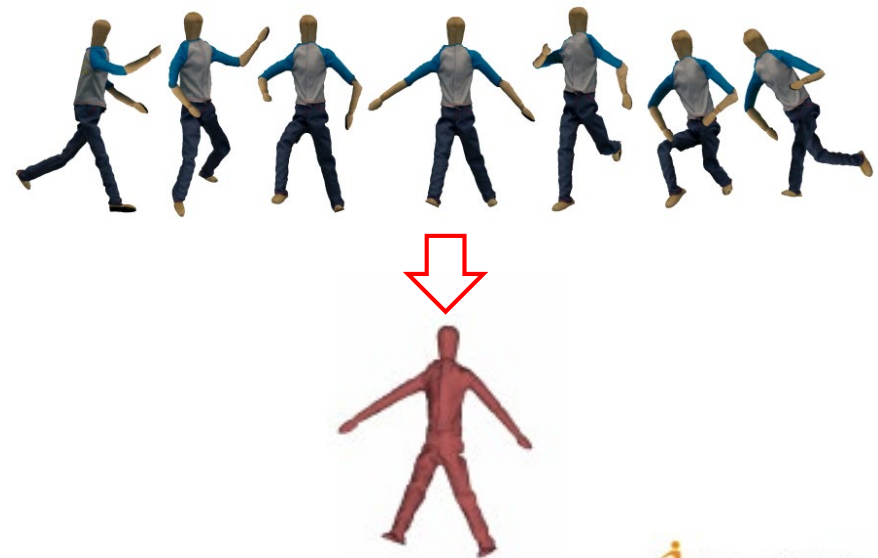
## 2 Types of Skinning Weight Calculation Methods

- Skinning weight를 계산하는 방법은 크게 두 가지 type으로 나눌 수 있음
  - Mathematical model based method
    - ✓ Mathematical model을 이용해 한 가지 자세의 data에서 weight를 계산
  - Example pose based method
    - ✓ 각기 다른 포즈의 여러 scanned data를 기반으로 weight를 계산

Mathematical model based method



Example pose based method



# Mathematical Model Based Method

□ Skinning weight 분포를 나타내는 **mathematical model**을 구성한 후, **bone**과 **mesh points**를 **대입**하여 weight를 도출하는 방식

- Orthogonal projection
- Gaussian distribution
- Heat diffusion

Mathematical model

$$\omega(k, i) = \begin{cases} 1, & PD_{ki} \geq 2\varepsilon \\ \frac{PD_{ki}}{\sum_{j=i}^q PD_{kj}}, & PD_{ki} < 2\varepsilon \end{cases}$$

$$\sum_i w_j^i \mathbf{T}^i(\mathbf{v}_j)$$

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-0.5)^2}{2c^2}}$$

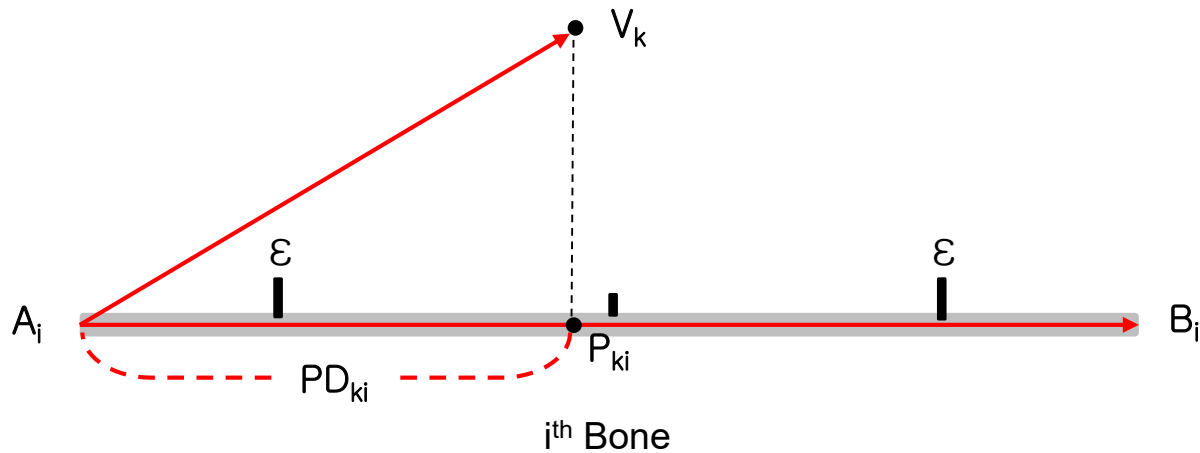
Human model



**Skinning weight  
도출**

# Orthogonal Projection

- Model 표면의 mesh point( $V_k$ )를 bone의 양 끝점을 잇는 벡터( $A_i B_i$ )로 projection한 점( $P_{ki}$ )의 위치에 따라 weight를 계산

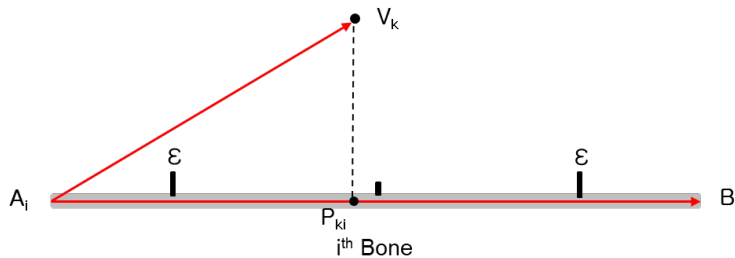


# Orthogonal Projection

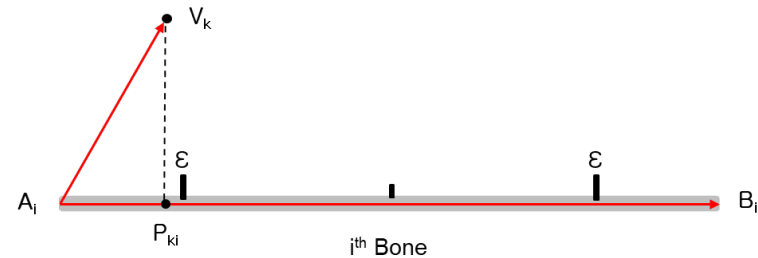
□ 미리 설정한 threshold ( $\epsilon$ )과  $P_{ki}$ 의 위치 관계에 따라 weight를 계산

$$\omega(k, i) = \begin{cases} 1, & PD_{ki} \geq 2\epsilon \rightarrow \text{Point } V_k \text{가 bone } A_i B_i \text{에 완전히 속해있는 경우} \\ \frac{PD_{ki}}{\sum_{j=i}^q PD_{kj}}, & PD_{ki} < 2\epsilon \rightarrow \text{그렇지 않고 여러 뼈를 고려해야 하는 경우} \end{cases}$$

**Case 1:  $PD_{ki} \geq 2\epsilon$**



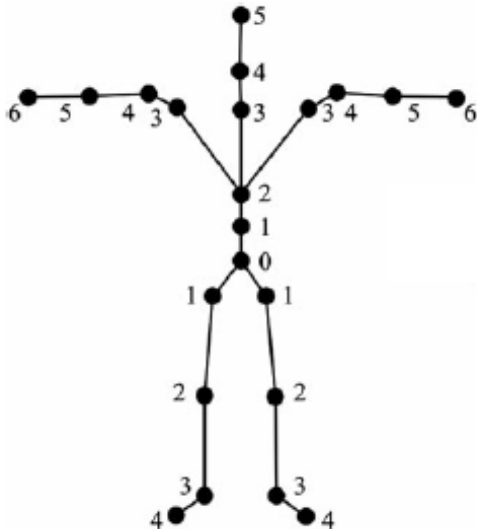
**Case 2:  $PD_{ki} < 2\epsilon$**



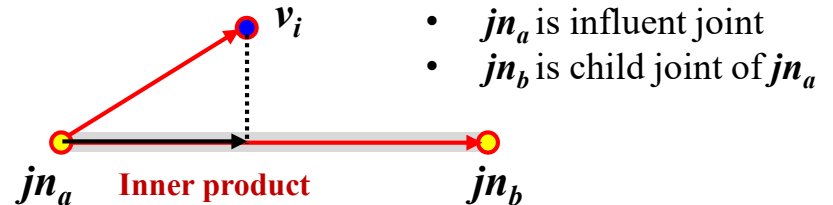
# Gaussian Distribution

- Model의 skeleton 구조에서 hierarchy를 먼저 정의
  - 중심을 최상위 계층 0으로, 뼈가 뻗어 나갈수록 하위 계층으로 1씩 증가
  - Hierarchy 숫자가 작은 joint가 parent joint, 숫자가 큰 joint가 child joint
  
- Parent joint ( $jn_a$ )와 표면 상의 점  $v_i$  를 잇는 벡터를 parent joint와 child joint를 잇는 bone 벡터에 projection하여 orthogonal projection value( $\delta$ )를 계산

**Skeleton hierarchy**



**Vector projection**



**Orthogonal projection value ( $\delta$ )**

$$\delta = \frac{(v_i - jn_a) \cdot (jn_b - jn_a)}{\|jn_b - jn_a\|^2}$$



# Gaussian Distribution

□ Orthogonal projection value를 Gaussian function에 대입하여 weight를 계산

➤ Gaussian function

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-0.5)^2}{2c^2}}$$

a: maximum value of f(x)

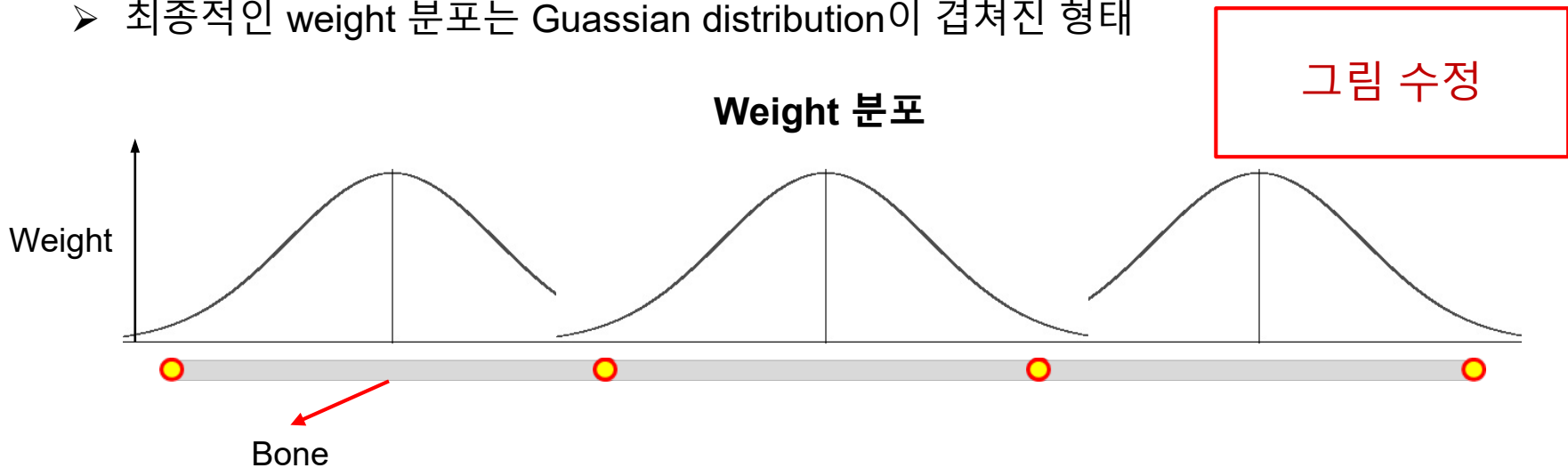
x: orthogonal projection value( $\delta$ )

c: constant, controlling inflection point

**Best parameter**

a = 1.3, c = 0.25

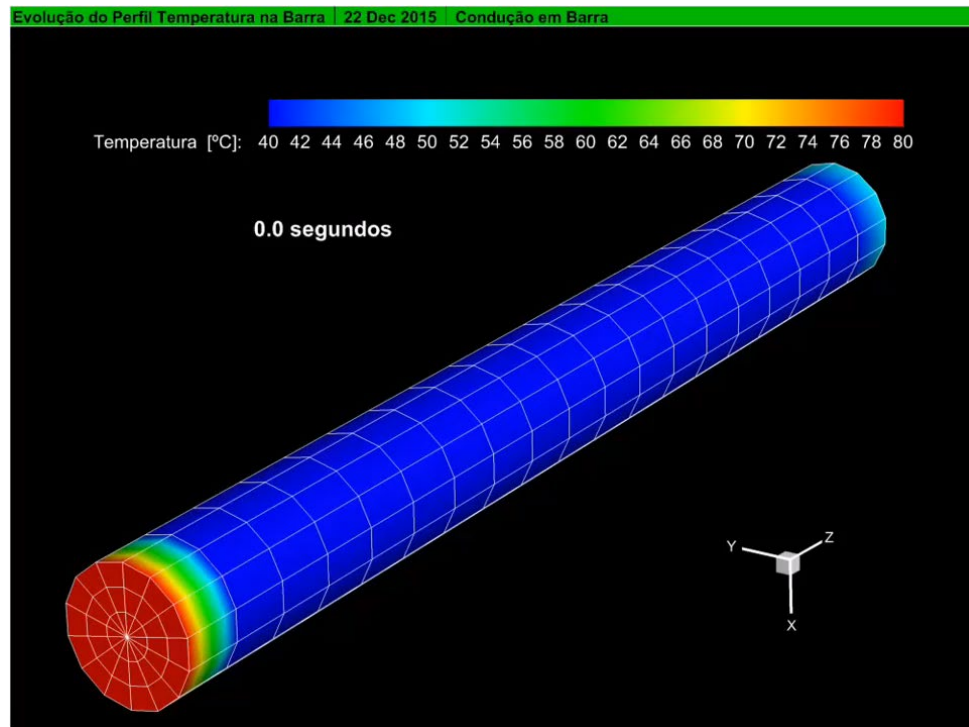
➤ 최종적인 weight 분포는 Gaussian distribution이 겹쳐진 형태



# Heat Diffusion

- 열 전도 현상과 열 평형 상태에서 motif를 얻은 mathematical model
  - 양 끝의 온도가 다른 실린더에서 열이 확산되는 온도 분포를 이용해 weight를 계산

실린더 양 끝의 온도가 80°C, 50°C일 때, 열 전도



# Heat Diffusion

□ Heat equilibrium equation을 적용하여 weight를 도출

- Point  $v$ 에 가장 가까운 bone의 온도를 1로, 나머지 bone의 온도를 0으로 설정
- Heat equilibrium equation

$$-\Delta w^i + Hw^i = Hp^i$$

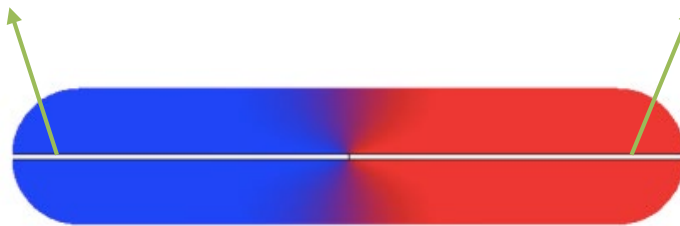
- $\Delta$  is the discrete surface Laplacian
- $p^i$  is a vector with  $p_j^i = 1$  if the nearest bone to vertex  $j$  is  $i$  and  $p_j^i = 0$  otherwise
- $H$  is the diagonal matrix with  $H_{ij}$  being the heat contribution weight of the nearest bone to vertex  $j$



## Weight Distribution

온도가 0으로 설정된 bone

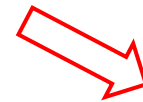
온도가 1로 설정된 bone



# Example Pose Based Method

1. 한 가지 model의 여러 pose에 대해 scanning
2. Static model을 각각의 pose로 변형하는 transformation matrix 도출
3. 모든 pose에서 transformation error가 최소화되는 weight 계산

## Scanning



Transformation matrix

$$\sum_{j=1, j \neq \hat{j}}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t)$$

## Error minimization

$$\min_{w, R, T} E = \min_{w, R, T} \sum_{t=1}^{|t|} \sum_{i=1}^{|V|} \left\| v_i^t - \sum_{j=1}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t) \right\|^2$$

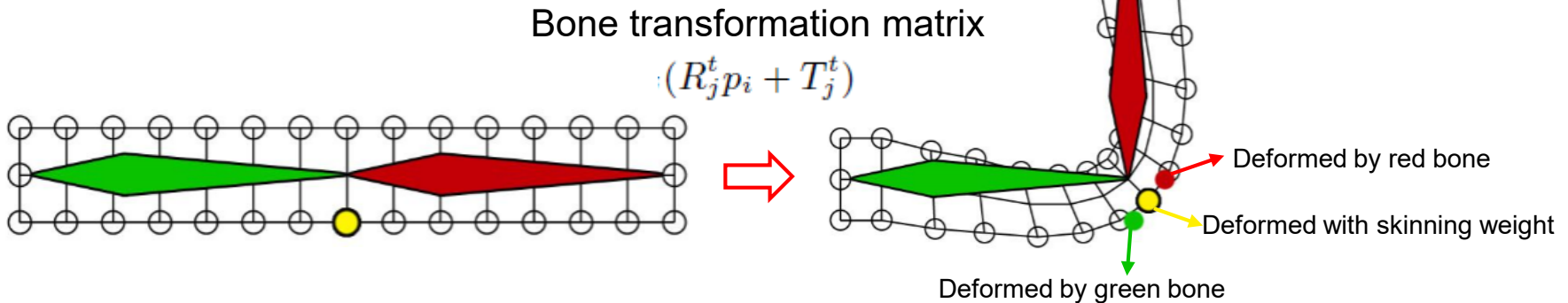


# Mesh Transformation Matrix

- Pose를 변형하는 bone transformation matrix에 bone과 mesh point의 weight를 곱해서 mesh point를 transformation

$$\sum_{j=1, j \neq \hat{j}}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t)$$

- $R_j^t$ : Pose t에서 bone j의 rotation matrix
- $T_j^t$ : Pose t에서 bone j의 translation matrix
- $p_i$ : Mesh point
- $w_{ij}$ :  $p_i$ 와 bone j의 skinning weight



# Error Minimization – Binh et al.(2012)

- Scanned data의 vertex point( $v_i^t$ )와 transformation matrix를 통해 계산된 vertex point의 **거리 차이를 최소화**

$$\min_{w,R,T} E = \min_{w,R,T} \sum_{t=1}^{|t|} \sum_{i=1}^{|V|} \left\| v_i^t - \sum_{j=1}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t) \right\|^2$$

$v_i^t$ : Original vertex point from scanned data  
 $\sum_{j=1}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t)$ : Transformed point

Subject to:  $w_{ij} \geq 0, \forall i, j$

Non-negativity

$$\sum_{j=1}^{|B|} w_{ij} = 1, \forall i$$

Affinity

$$|\{w_{ij} | w_{ij} \neq 0\}| \leq |K|, \forall i$$

Sparseness

$$R_j^{t\top} R_j^t = I, \det R_j^t = 1, \forall t, j$$

Orthogonality

# Error Minimization – Fechteler et al.(2018)

- Binh et al.(2012)에서 적용한 것과 같은 두 vertex point의 거리 차이(data term)에 **shape prior term**이라는 새로운 error term을 추가
  - Shape prior term: Laplace operator를 이용하여 scanned data 상에서 **인접한 points들이 비슷한 특성(표면 곡률, 곡면 방향 등)을 갖도록 하는 term**

$$E_{\text{kin}} = \sum_{\substack{f=1\dots F \\ j=1\dots|\mathbf{X}^0|}} \underbrace{|v_j^{\text{scan } f} - \mathcal{S}_f(v_j)|^2}_{\text{Data term}} + \underbrace{\alpha |\mathcal{L}[v_j^{\text{scan } f}] - \mathcal{L}[\mathcal{S}_f(v_j)]|^2}_{\text{Shape prior term}}$$

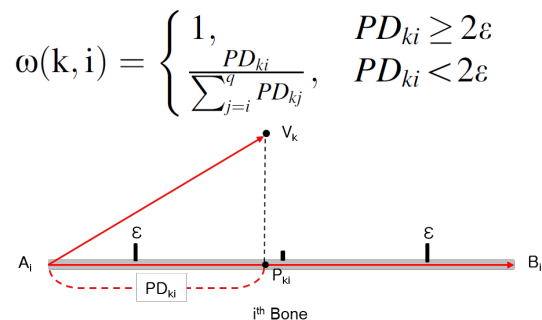
표면 곡률 관련 그림 추가



# Discussion(1/2)

□ Skinning weight를 도출하는 방법을 크게 2가지로 나눌 수 있음을 확인

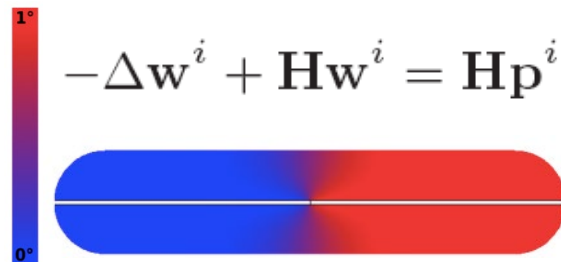
➤ Mathematical model based method



$$\omega(k, i) = \begin{cases} 1, & PD_{ki} \geq 2\epsilon \\ \frac{PD_{ki}}{\sum_{j=i}^q PD_{kj}}, & PD_{ki} < 2\epsilon \end{cases}$$

$$\delta = \frac{(v_i - jn_a) \cdot (jn_b - jn_a)}{\|jn_b - jn_a\|^2}$$

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-0.5)^2}{2c^2}}$$



➤ Example pose based method



$$E_{kin} = \sum_{\substack{f=1 \dots F \\ j=1 \dots |X^0|}} |v_j^{scan^f} - S_f(v_j)|^2 + \alpha |\mathcal{L}[v_j^{scan^f}] - \mathcal{L}[S_f(v_j)]|^2$$

$$E_{\hat{j}}^t = \sum_{i=1}^{|V|} \left\| v_i^t - \sum_{j=1, j \neq \hat{j}}^{|B|} w_{ij} (R_j^t p_i + T_j^t) - w_{i\hat{j}} (R_{\hat{j}}^t p_i + T_{\hat{j}}^t) \right\|^2$$

# Discussion(2/2)

## □ 2가지 method의 특징 파악

### Mathematical Model Based Method

- 하나의 pose에서 weight 도출
- Input data로 Model의 skeleton 정보 필요
- 빠르고 간단한 계산

Model이 복잡하거나 scanning이 힘든 경우에 활용할 수 있음

### Example Pose Based Method

- 여러 pose의 scanned data
- Example pose를 통해 skeleton 추출 가능
- Model의 mesh points의 수가 많아질수록 계산이 복잡해짐

다양한 자세를 scanning 가능한 간단한 model에 활용할 수 있음

# Future Work

- Review 내용을 바탕으로 weight calculation algorithm을 구현 및 적용
  - 여러 weight calculation method를 하나의 hand template model에 적용
  - 계산 시간, estimate error 측면에서 weight 계산 결과를 비교
  - Weight가 적용된 hand model의 pose를 변형하면서 calculation quality를 비교

Hand model 관련 그림 추가