

# Análisis Experimental de la Extracción del Esqueleto por Contracción con Suavizado Laplaciano

Alexander Pinzón Fernández

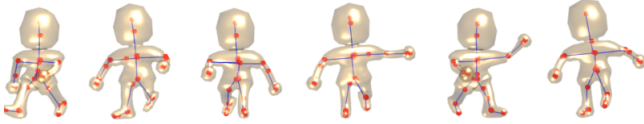


Figura 1. El método de extracción de un esqueleto 1D por medio de la contracción usando el suavizado Laplaciano. De izquierda a derecha se observa el esqueleto obtenido desde distintas poses del modelo.

**Resumen**—En este artículo se realiza la evaluación del método de extracción del esqueleto por medio de contracción de un volumen y suavizado Laplaciano de superficie. Se realizó varios experimentos con un modelo 3D animado comparando las diferencias de los esqueletos extraídos en distintos instantes de la animación. Nuestros resultados muestran fallas del método debido a las transformaciones isométricas, y la simplificación de mallas.

**Index Terms**—extracción del esqueleto, Suavizado Laplaciano

## I. INTRODUCCIÓN

La extracción del esqueleto es un problema fundamental en computación gráfica que tiene muchas aplicaciones en otras áreas del conocimiento como la medicina, el cine animado, los diseños ergonómicos entre otros. Nuestro interés es usarlo como parte de un proceso de registro de movimiento de una persona realizando distintas acciones como caminar, trotar entre otras actividades.

En la literatura se encuentran distintos métodos para la extracción del esqueleto y dado que no existe una definición formal para un esqueleto [3], una definición cercana para el esqueleto es tomada del Eje Medio, el eje medio de un objeto 3D es definido como el lugar donde se encuentran los centros de todas las esferas de máximo radio inscritas en el cuerpo. Los resultados de una extracción pueden ser muy diferentes dependiendo el método de extracción usado. Ya en algunos estados del arte sobre esqueletos de curvas se realizan clasificaciones de estos métodos de extracción del esqueleto según su aplicación siendo más sencillo evaluar las propiedades deseadas del esqueleto para así escoger un método existente que se ajuste a los requerimientos de nuestra aplicación [1].

El método de extracción del esqueleto por medio del suavizado Laplaciano [2], se ajusta a las propiedades deseadas de nuestro proyecto, que son lo homotópico del esqueleto con respecto al cuerpo y las conexiones jerárquicas entre sus

partes. Nuestro proyecto consiste en el registro del movimiento de un cuerpo que es observado desde distintos ángulos, a estos sistemas se les denomina sistemas ópticos de captura de movimiento [10], en este proyecto no se cuenta con un esqueleto modelo siendo necesario encontrar un esqueleto para cada captura, brindando la posibilidad de capturar el movimiento de no solo personas sino también animales y dispositivos animados como robots.

El artículo presenta en el capítulo II un resumen sobre trabajos relacionados en el área de la extracción del esqueleto. En el capítulo III se hace una descripción detallada de la técnica de extracción del esqueleto por contracción con suavizado Laplaciano. En el capítulo IV se muestra información referente al experimento realizado con un modelo creado y animado en computadora. En el capítulo V se realiza un análisis de los datos recopilados durante la experimentación, y por último en el capítulo VI se realizan unas conclusiones y se dan algunos lineamientos para el trabajo futuro, para complementar y mejorar el método de extracción analizado.

## II. TRABAJO RELACIONADO

Los esqueletos son estructuras 1D que representan una versión simplificada de la geometría y topología de un objeto 3D. Mientras la representación 3D es invaluable, muchas aplicaciones requieren representaciones alternativas como un esqueleto de estos modelos [3]. Los esqueletos reducen la dimensionalidad de objetos digitales pero al mismo tiempo un camino para capturar las relaciones dinámicas esenciales [9].

La extracción del esqueleto se realiza convencionalmente con técnicas en las cuales hay una reducción iterativa de la forma tridimensional con ciertas restricciones de contracción y minimización de energía, hasta encontrar un esqueleto irreducible [2]. Otros métodos utilizan distintas representaciones topológicas de un objeto tridimensional mediante grafos, luego realizan una simplificación de este grafo, y por último utilizan un esqueleto modelo el cual transforman para minimizar el error entre el esqueleto y el grafo dado por medio de alguna métrica basada en heurísticas [4].

Algunos métodos realizan estimaciones del esqueleto en 2D, y luego utilizan información a priori para estimar como fue transformado el esqueleto tridimensional real [7], otros enfoques realizan una reducción iterativa del volumen del cuerpo usando restricciones de contracción y minimización de energía, hasta encontrar un esqueleto irreducible [2].

Otros métodos usan modelos probabilísticos para resolver ambas cosas: Incorporar las dependencias espaciales entre los vértices en el proceso de agrupamiento, y proveer una solución globalmente óptima. En particular, basados en Campos Aleatorios de Markov Gibbs (MRF) [6].

Para seleccionar un método de extracción lo necesario es un análisis de las propiedades deseadas del esqueleto, según se requiera por las distintas aplicaciones, y un estudio de cómo los métodos existentes satisfacen estas propiedades [8].

### III. MÉTODO DE CONTRACCIÓN CON SUAVIZADO LAPLACIANO

La contracción es tomada como un problema de minimización de energía, con los siguientes terminos.

- Operador Laplaciano para remover las frecuencias altas, es decir suavizar los detalles de la geometría
- Una fuerza de atracción que usa los vértices, para mantener información clave de la geometría durante la contracción.

Una vez la malla tiene un volumen de cero, se pasa por un proceso de colapso de bordes, para obtener el esqueleto. El proceso de colapso de bordes tiene restricciones para mantener una coherente representación de la malla.

#### III-A. Suavizado de Laplace

Para cada vértice en la malla, una nueva posición estará dada en base de la de sus vecinos

- $x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N x_j$ .
- Donde N es el numero de vértice vecinos de  $x_i$
- Esta aproximación en general se restringe por una función de peso para ponderar alguna característica deseada.
- $x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N w_j x_j$ .
  - En este caso se añade una función de peso  $w_j$ , para ponderar el vértice  $x_j$ . Por ejemplo la distancia al vértice  $x_i$

#### III-B. Extracción del Esqueleto

Dada una malla de poligonos  $G = (V, E)$ , con vértices  $V$  y aristas  $E$ , donde  $V = [v_1^T, v_2^T, \dots, v_n^T]$  son la posición de los vértices. Entonces el problema de extraer un esqueleto  $S = (U, B)$  siendo  $U$  los nodos y  $B$  las aristas, donde  $U = [u_1^T, u_2^T, \dots, u_m^T]$  las posiciones de los nodos. Este método de extracción se basa en un proceso de contracción de la geometría que iterativamente suaviza y colapsa la geometría de la malla en una manera restringida. Este proceso es aplicado en el espacio de objeto, directamente en la representación de la malla, sin cualquier proceso de voxelización. Con las fuerzas de contracción cuidadosamente ponderadas y las fuerzas de atracción, el proceso de contracción produce una forma mínima delgada con empalmes y las ramas correspondientes a las particiones del objeto [2].

#### III-C. Contracción de la Geometría

El vertice de la posición  $V'$  es suavizado y contraído a lo largo de dirección de su normal, como resultado de la solución de la ecuación discreta de Laplace  $LV' = 0$ , donde  $L$  es la curvatura del flujo del campo del operador de Laplace de  $n \times n$ , con los elementos.

$$L_{ij} = \begin{cases} w_{ij} = \cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij} & \text{si } (i, j) \in E \\ \sum_{(i,k) \in E}^k -w_{ij} & \text{si } i = j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$  son los ángulos opuestos correspondiente al borde  $(i, j)$ , como se observa en la figura 2.

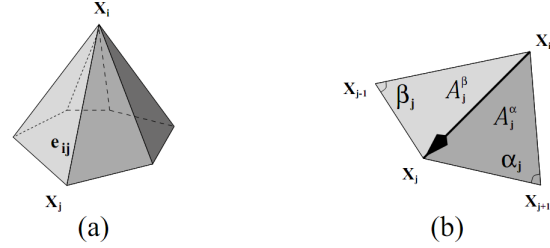


Figura 2. a) El borde entre  $x_i, x_j$ . b) Los ángulos opuestos  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$ . Imagen Tomada de Desbrun [5].

Dada la ponderación cotangente, las coordenadas de Laplace  $\delta = LV = [\delta_1^T, \delta_2^T, \dots, \delta_n^T]^T$  aproximan hacia adentro de la normal de la curvatura del flujo.

$\delta_i = -4A_i \kappa_i \mathbf{n}_i$ , donde  $4A_i$ ,  $\kappa_i$  y  $\mathbf{n}_i$  son el área de un anillo local, con esto se aproximan la curvatura media local, y se aproxima la normal hacia afuera del vertice  $i$ .

Entonces resolviendo  $LV' = 0$ , significa remover el componente de la normal y contraer la geometría de la malla.

Las restricciones de atracción, son fuerzas que atraen los vértices hacia la geometría.

La solución del siguiente sistema, proporciona las nuevas posiciones de los vértices  $V'$

$$\begin{bmatrix} W_L L \\ W_H \end{bmatrix} V' = \begin{bmatrix} 0 \\ W_H V \end{bmatrix}$$

donde  $W_H$  son las restricciones de atracción y  $W_L$  las restricciones de contracción.

La solución se logra mediante mínimos cuadrados así.

$$\|W_L LV'\|^2 + \sum_j W_{H,i} \|v'_j - v_i\|^2$$

El proceso iterativo de contracción es el siguiente, donde  $t$  representa cada iteración.

1. Resolver  $\begin{bmatrix} W_L^t L^t \\ W_H^t \end{bmatrix} V^{t+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ W_H^t V^t \end{bmatrix}$  para  $V^{t+1}$
2. Actualizar  $W_L^{t+1} = S_L W_L^t$  y  $W_{H,i}^{t+1} = W_{H,i}^0 \sqrt{\frac{A_i^0}{A_i^t}}$ , donde  $A_i^t$  y  $A_i^0$  son los actuales y originales áreas de un anillo, respectivamente.
3. Computar el nuevo operador de Laplace  $L^{t+1}$  con las actuales posiciones de los vértices  $V^{t+1}$  usando la definición de  $L_{i,j}$

### IV. EXPERIMENTACIÓN

Se usó la implementación hecha en [2] por los autores, para realizar la extracción del esqueleto a un modelo tridimensional

creado (ver figura 3) y animado en computadora, la animación consiste en una caminata en la cual el personaje alza el brazo izquierdo mientras camina.

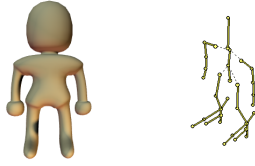


Figura 3. Personaje creado y animado en computadora, a la izquierda el personaje y en la derecha el esqueleto usado para la animación basado en el sistema de animación con esqueletos del programa 3D Blender.

El personaje se tomo del demo proporcionado por la compañía de animación Blender<sup>1</sup>, llamado motionblender. En este demo el personaje estaba animado por medio de un esqueleto que realizaba una caminata a lo largo de un camino planeado.

Se realizaron 6 capturas de la geometría del personaje cada 10 cuadros de la animación.

Para la primera captura se realizaron 5 extracciones del esqueleto variando el numero de nodos durante el proceso de simplificación y con un numero de 10 iteraciones para el proceso de simplificación como lo recomiendan en [2], encontrando un numero óptimo de nodos de 24. En la tabla I se muestran 5 columnas que representan la siguiente información, en la columna **Nodos** se muestra el numero de vértices que se desean obtener después del proceso de simplificación, en la columna **Validos** se muestra el numero de nodos que están correctamente localizados y que representaban uniones en el esqueleto, en la columna **Erróneos** se muestra el numero de nodos que están ocupando espacios que no corresponden a uniones en la jerarquía, o que están sobre una línea entre dos uniones reales del esqueleto, por ultimo en la columna **Faltantes** se muestra el numero de nodos que hicieron falta para la correcta reconstrucción de un esqueleto valido para este modelo.

Cuadro I  
VARIACIÓN DEL NUMERO DE NODOS EN EL PROCESO DE SIMPLIFICACIÓN.

Nodos	Validos	Erróneos	Faltantes
16	15	1	3
20	16	4	1
24	17	7	0
28	17	11	0
32	17	15	0

La segunda etapa del experimento consistía en la realización de extracciones del esqueleto en distintos momentos de la animación y observar la correspondencia topológica entre los esqueletos obtenidos para así observar como se comporta el método frente a transformaciones isometricas de la geometría de un cuerpo.

En esta segunda etapa se realizaron 10 iteraciones durante el proceso de contracción y se usaron 24 nodos en el proceso de simplificación. En la tabla II se observan los resultados obtenidos al realizar cambios isometricos sobre la geometría del personaje estos cambios representan las distintas poses que

tomaba la geometría del personaje en distintos momentos de la animación. En la tabla II la columna **Cuadro** representa el momento en el tiempo en el cual se realizo la captura de la geometría, las demás columnas representan la misma información que en la tabla I.

Cuadro II  
CAMBIOS ISOMETRICOS SOBRE LA GEOMETRÍA.

Cuadro	Validos	Erróneos	Faltantes
1	17	7	0
11	14	10	3
21	16	8	1
31	15	9	2
41	17	7	0
51	14	10	3

## V. RESULTADOS

El método de extracción del esqueleto estudiado requiere un 40 % mas de los nodos necesarios para reconstruir un esqueleto correcto en términos del mínimo numero de nodos necesarios para reconstruirlo.

El método de extracción luego de obtener un numero de faltantes de 0 al aumentar el numero de nodos no pierde precisión.

El método de extracción usado solo recupera de forma correcta el esqueleto sin faltantes en el 33 % de los casos.

El método de extracción siempre presenta nodos erróneos.

El método de extracción recupera el 91 % de la información necesaria para reconstruir el esqueleto basado en el numero de nodos validos que se obtienen.

## VI. CONCLUSIONES

El método de extracción mostró tener gran sensibilidad frente a cambios isometricos de la geometría, además proporciona información errónea sobre la jerarquía del esqueleto al proporcionar nodos en localizaciones y uniones no correctas.

El método recupera una buena aproximación del esqueleto. Como trabajo futuro se puede mejorar la recuperación de información haciendo uso de la coherencia espacio temporal no presente en la técnica de extracción.

Como trabajo futuro también es posible crear un método para automatizar el proceso de simplificación para encontrar el numero óptimo de nodos con el cual puede ser representado el esqueleto de forma correcta, haciendo uso de algoritmos de partición de mallas.

## REFERENCIAS

- [1] D. Attali, J.-D. Boissonnat, and H. Edelsbrunner. Stability and computation of the medial axis — a state-of-the-art report. *Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration*, 1:–, 2007. Skeleton Extraction survey.
- [2] Oscar Kin-Chung Au, Chiew-Lan Tai, Hung-Kuo Chu, Daniel Cohen-Or, and Tong-Yee Lee. Skeleton extraction by mesh contraction. *ACM Transactions on Graphics*, 27(3):10, 2008. Skeleton Extraction.
- [3] Nicu D. Cornea and Patrick Min. Curve-skeleton properties, applications, and algorithms. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(3):530–548, 2007. Skeleton Extraction Survey Member-Silver, Deborah.

<sup>1</sup>Blender Software Foundation <http://www.blender.org>

- [4] Edilson de Aguiar, Carsten Stoll, Christian Theobalt, Naveed Ahmed, Hans-Peter Seidel, and Sebastian Thrun. Performance capture from sparse multi-view video. In *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 papers*, pages 1–10, New York, NY, USA, 2008. ACM. 3D Reconstruction.
- [5] Mathieu Desbrun, Mark Meyer, Peter Schröder, and Alan H. Barr. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 317–324, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. Skeleton Extraction.
- [6] Guillaume Lavoué and Christian Wolf. Markov random fields for improving 3d mesh analysis and segmentation. In *Eurographics 2008 Workshop on 3D Object Retrieval*, April 2008. Skeleton Extraction.
- [7] Fabio Remondino and Andreas Roditakis. 3d reconstruction of human skeleton from single images or monocular video sequences, 2003. 3D Reconstruction.
- [8] J. Starck, G. Miller, and A. Hilton. Video-based character animation. In *SCA '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 49–58, New York, NY, USA, 2005. ACM. Motion Capture.
- [9] S. Svensson, I. Nyström, and G. Sanniti di Baja. Curve skeletonization of surface-like objects in 3d images guided by voxel classification. *Pattern Recognition Letters*, 23(12):1419 – 1426, 2002. Skeleton Extraction.
- [10] Jessica Junlin Wang and Sameer Singh. Video analysis of human dynamics - a survey. *Real Time Imaging*, 9:321–346, 2003. Motion Capture survey.