



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Adapted Laplacian Operator For Hybrid Quad/Triangle Meshes

Alexander Pinzón Fernández

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Sistemas e Industrial  
Bogotá, Colombia  
2013

# Adapted Laplacian Operator For Hybrid Quad/Triangle Meshes

Alexander Pinzón Fernández

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of:

**Master in Systems Engineering and Computer Science**

Advisor:

Eduardo Romero Castro , Ph.D.

Research Area:

Computer Graphics

CIMALAB Research Group

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingenieria, Departamento de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2013

## Dedicatoria

Su uso es opcional y cada autor podrá determinar la distribución del texto en la página, se sugiere esta presentación. En ella el autor dedica su trabajo en forma especial a personas y/o entidades.

Por ejemplo:

A mis padres  
o

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein

# Agradecimientos

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización de la tesis o trabajo de investigación. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al documento.

## Resumen

El resumen es una presentación abreviada y precisa (la NTC 1486 de 2008 recomienda revisar la norma ISO 214 de 1976). Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Se recomienda que este resumen sea analítico, es decir, que sea completo, con información cuantitativa y cualitativa, generalmente incluyendo los siguientes aspectos: objetivos, diseño, lugar y circunstancias, pacientes (u objetivo del estudio), intervención, mediciones y principales resultados, y conclusiones. Al final del resumen se deben usar palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), las cuales permiten la recuperación de la información.

**Palabras clave:** (máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado).

A continuación se presentan algunos ejemplos de tesauros que se pueden consultar para asignar las palabras clave, según el área temática:

**Artes:** AAT: Art y Architecture Thesaurus.

**Ciencias agropecuarias:** 1) Agrovoc: Multilingual Agricultural Thesaurus - F.A.O. y 2) GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus.

**Ciencias sociales y humanas:** 1) Tesauro de la UNESCO y 2) Population Multilingual Thesaurus.

**Ciencia y tecnología:** 1) Astronomy Thesaurus Index. 2) Life Sciences Thesaurus, 3) Subject Vocabulary, Chemical Abstracts Service y 4) InterWATER: Tesauro de IRC - Centro Internacional de Agua Potable y Saneamiento.

**Tecnologías y ciencias médicas:** 1) MeSH: Medical Subject Headings (National Library of Medicine's USA) y 2) DECS: Descriptores en ciencias de la Salud (Biblioteca Regional de Medicina BIREME-OPS).

**Multidisciplinarias:** 1) LEMB - Listas de Encabezamientos de Materia y 2) LCSH- Library of Congress Subject Headings.

También se pueden encontrar listas de temas y palabras claves, consultando las distintas bases de datos disponibles a través del Portal del Sistema Nacional de Bibliotecas<sup>1</sup>, en la sección Recursos bibliográficos. opción "Bases de datos".

## Abstract

---

<sup>1</sup>ver: [www.sinab.unal.edu.co](http://www.sinab.unal.edu.co)

Es el mismo resumen pero traducido al inglés. Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Al final del Abstract se deben traducir las anteriores palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), llamadas keywords. Es posible incluir el resumen en otro idioma diferente al español o al inglés, si se considera como importante dentro del tema tratado en la investigación, por ejemplo: un trabajo dedicado a problemas lingüísticos del mandarín seguramente estaría mejor con un resumen en mandarín.

**Keywords:** palabras clave en inglés(máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado)

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Aproximaciones Clave . . . . .	4
1.1.1. Sistemas Ópticos . . . . .	4
1.1.2. Extracción del Esqueleto . . . . .	5
1.2. Organización del Documento . . . . .	5
<b>2. Trabajo Relacionado</b>	<b>6</b>
2.1. Adquisición de Datos . . . . .	6
2.2. Segmentación de Imágenes . . . . .	7
2.3. Reconstrucción Tridimensional . . . . .	7
2.3.1. Reconstrucción Basada en Imágenes . . . . .	7
2.4. Extracción del Esqueleto . . . . .	8
2.4.1. Variedades . . . . .	8
<b>3. Extracción del Esqueleto</b>	<b>10</b>
3.1. Método De Contracción Con Suavizado Laplaciano . . . . .	10
3.1.1. Suavizado de Laplace . . . . .	11
3.1.2. Extracción del Esqueleto . . . . .	11
3.1.3. Contracción de la Geometría . . . . .	11
3.2. Comparación Experimental . . . . .	12
3.3. Resultados Experimentales . . . . .	15
<b>4. Sistema de Captura con Videocámaras</b>	<b>17</b>
4.1. Ubicación de las Cámaras . . . . .	17
4.2. Calibración de Cámaras . . . . .	17
4.3. Captura Sincronizada de Vídeos . . . . .	17
4.4. Resultados Experimentales . . . . .	17
<b>5. Extracción de las Siluetas Mediante el Método <math>\Sigma - \Delta</math></b>	<b>18</b>
5.1. Sustracción de Fondo . . . . .	18

---

5.2. Extracción de Fondo Estático $\Sigma - \Delta$ . . . . .	18
5.3. Segmentación de Vídeo . . . . .	18
5.4. Resultados Experimentales . . . . .	18
<b>6. Extracción de Puntos Característicos</b>	<b>19</b>
6.1. Puntos Característicos . . . . .	19
6.2. Segmentación de Puntos Característicos . . . . .	19
6.3. Seguimiento de Puntos Característicos . . . . .	19
6.4. Resultados Experimentales . . . . .	19
<b>7. Reconstrucción Tridimensional del Cuerpo</b>	<b>20</b>
7.1. Reconstrucción Estereoscópico . . . . .	20
7.2. Triangulación de Delaunay . . . . .	20
7.3. Forma desde las siluetas . . . . .	20
7.4. Resultados Experimentales . . . . .	20
<b>8. Seguimiento del Esqueleto</b>	<b>21</b>
8.1. Coherencia espacial y Temporal . . . . .	21
8.2. Estimación de Pose . . . . .	21
8.3. Comparación Experimental . . . . .	21
8.4. Resultados Experimentales . . . . .	21
<b>9. Programa de Computadora Desarrollado</b>	<b>22</b>
9.1. Sistema de Visualizacion . . . . .	22
9.2. Diseño del Sistema . . . . .	22
9.3. Descripcion de la Implementacion . . . . .	22
<b>10. Conclusiones</b>	<b>23</b>
10.1. Trabajo Futuro . . . . .	23
<b>Bibliography</b>	<b>24</b>



# Índice de figuras

<b>3-1.</b>	Proceso de extracción del esqueleto . . . . .	10
<b>3-2.</b>	a) El borde entre $x_i$ , $x_j$ . b) Los ángulos opuestos $\alpha_{ij}$ y $\beta_{ij}$ . Imagen Tomada de [12]. . . . .	12
<b>3-3.</b>	Modelo tridimensional obtenido con el método de [31]. . . . .	13
<b>3-4.</b>	Variación del numero de nodos . . . . .	14
<b>3-5.</b>	Distintas posiciones del mismo cuerpo. . . . .	15
<b>3-6.</b>	Gráfico de la variación de nodos validos, erróneos y faltantes durante la fase de simplificación . . . . .	16

# Índice de cuadros

<b>3-1.</b> Variación del numero de nodos en el proceso de simplificación. . . . .	14
<b>3-2.</b> Cambios isométricas sobre la geometría. . . . .	15
<b>3-3.</b> Resultados obtenidos al realizar transformaciones isométricas . . . . .	16

El estudio y registro del movimiento de un cuerpo con extremidades articuladas, como una persona o un animal, ha sido de interés en varias aéreas del conocimiento. Por ejemplo, la anatomía humana y animal, la ingeniería y las artes. El registro de movimiento ha sido usado para resolver distintos tipos de problemas, por ejemplo: en el diagnostico de patologías asociadas a la marcha en seres humanos, la captura del movimiento de un actor para dar vida a un personaje animado, o el análisis ergonómico para el diseño de productos y herramientas.

El seguimiento de movimiento se realiza convencionalmente con costosos sistemas ópticos de captura que varían entre los 150 y 400 millones de pesos aproximadamente <sup>2</sup>. Este seguimiento del movimiento presenta inconvenientes como el uso de marcadores en forma de trajes y dispositivos pegados al cuerpo y sus extremidades, que alteran la naturalidad de los movimientos. Además, se necesita de expertos para posicionar los marcadores, pues los marcadores deben estar localizados en puntos antropométricos específicos. Otro inconveniente de estos sistemas estereoscópicos que realizan una reconstrucción tridimensional desde múltiples puntos de vista es que manejan grandes volúmenes de datos correspondientes a la geometría del cuerpo, con lo cual se requiere maquinas de alto rendimiento.

En este sistema se propone eliminar el uso de marcadores sujetos al cuerpo junto con el uso de cámaras de bajo costo. Los datos de este sistema calibrado de cámaras, son usados para segmentar las siluetas mediante el método Sigma-Delta, con los cuales se realiza una reconstrucción estereoscópica 3D del cuerpo. una vez reconstruido se realiza una extracción del esqueleto mediante la contracción suavizada del volumen por medio de cálculos vectoriales con el operador de Laplace-Beltrami. Por último para validar nuestros resultados, se compara el método contra otros desarrollados, midiendo su eficacia en características como la homotopía con respecto al cuerpo original, la invariancia bajo transformaciones isométricas, y lo centrado con respecto a la superficie media.

The study and record of the movement of a body with extremities articulated, such as a

---

<sup>2</sup>Estos datos fueron recopilados durante mayo del año 2009 de cotizaciones realizadas a empresas de Suecia, Estados unidos y Italia

person or an animal, it has been of interest in several areas of knowledge. For instance, the human anatomy and animal, engineering and arts. The record of movement has been used to resolve several types of problems, for instance: In the I diagnose of correlated pathologies the march in human beings, the capture of the movement of an actor to give an animate character life, or the ergonomic analysis for the design of products and tools.

The tracking of movement is done conventionally with costly optic systems of capture that they vary between the 55.000 and 220.000 us dollars approximately <sup>3</sup>. This tracking of the movement presents inconveniences like the use of markers in the form of suits and attached devices to the body and its extremities, that they alter the spontaneity of the movements. Also, it is needed of experts to position markers, because markers must be located at anthropometric specific points. Another inconvenience of these stereoscopic systems that accomplish a three-dimensional reconstruction from multiple points of view is the fact that the big volumes of correspondent data drive the geometry of the body, with which requires high-performance machines itself.

It is proposed eliminating the use of fastened markers to the body along with the use of low-cost cameras in this system. The data of this system calibration of cameras, Sigma Delta, the one with which a stereoscopic reconstruction the one is accomplished are used to segment the silhouettes by means of the method 3D of the body once reconstructed accomplishes an extraction of the skeleton by means of the contraction softened of the volume by means of vectorial calculations with Laplace Beltrami's operator itself. Finally to validate our results, the method against developed others is compared, measuring his efficacy in characteristics like the homotopy regarding the original body, the low invariance isometric transformations, and what's centered regarding the half a surface.

---

<sup>3</sup>These data were collected during May of the year 2009 of quotations accomplished to Swedish, united States and Italy companies.

# 1 Introducción

El estudio del movimiento de los objetos a cautivado al hombre desde la antigüedad, algunas veces con la intención de reproducirlo en robots y animales mecánicos, como el ave mecánica del griego Arquitas del siglo IV antes de cristo [29], o en el caso de Leonardo Da vinci quien diseño un robot humanoide que realizaba movimientos como sentarse, alzar los brazos, mover la cabeza y mover la mandíbula basado en sus conocimientos de anatomica [29].

Una definición formal para estudiar el movimiento de los objetos se encuentra mediante el registro de movimiento el cual se refiere a la medición realizada por un observador de la posición con respecto al tiempo de una partícula en un sistema de referencia.

El registro del movimiento del cuerpo humano se ha especializado a lo largo de los años con la llegada de nuevas tecnologías que ayudan a realizarlo de forma mas precisa como en el caso de los sensores inerciales y los rotoscopios, otra de las tecnologías para registrar el movimiento del cuerpo humano son los sistemas ópticos en los cuales se usan una o mas cámaras para grabar a un actor, para posteriormente mediante procesamiento fotogrametrico encontrar las posiciones exactas del cuerpo y sus partes a lo largo del vídeo[11].

En el registro del movimiento de un cuerpo humano generalmente se usa un esqueleto modelo que representa cada una de las extremidades y sus articulaciones dado que el esqueleto es una representación sintetizada del cuerpo. Encontrar el correspondiente esqueleto de un cuerpo humano, animal o de algún objeto, en general es estudiado dentro del área de la computación gráfica denominada extracción del esqueleto[7].

## 1.1. Aproximaciones Clave

El registro de movimiento del cuerpo humano se realiza tradicionalmente hoy día con sistemas ópticos que usan marcadores y hacen uso de un esqueleto modelo conocido a priori.

### 1.1.1. Sistemas Ópticos

Los sistemas ópticos para el registro de movimiento tiene dos enfoques importantes uno con el uso de marcas, y otro sin ellas. En el registro con el uso de leds o reflectores como marcadores se hace un filtrado de la imagen para localizar estos puntos, con estos puntos segmentados y

localizados en las imágenes se procede a realizar una estimación tridimensional de cada punto, con lo que se registra el movimiento de cada parte del cuerpo en el cual habian marcadores presentes [30]. En el registro sin el uso de marcadores se realiza primero una reconstrucción tridimensional del cuerpo mediante el uso de las siluetas y puntos característicos encontrados en los vídeos mediante procesamiento de imágenes, con el cuerpo reconstruido se realiza una estimación de la pose de un esqueleto modelo, la pose del esqueleto es el registro del movimiento como tal de actor que se observo [34].

### 1.1.2. Extracción del Esqueleto

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 ultimo 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 [8].

## 1.2. Organización del Documento

Este documento esta organizado la siguiente forma. En el capitulo 2 se proporciona un estado del arte sobre los sistemas ópticos de captura de movimiento y la extracción del esqueleto. En el capitulo 3 se habla de la captura de los vídeos desde varias cámaras a un mismo actor, tomando en cuenta puntos como la calibración, la sincronización, la iluminación, y la ubicación de las cámaras. En el capitulo 4 mostraremos la extracción de la silueta del actor desde los vídeos mediante la implementación del método  $\Sigma - \Delta$  para sustracción del fondo. En el capitulo 5 se hablara sobre los puntos característicos en una imagen, de como estos puntos son invariantes a través del tiempo y como se les puede hacer seguimiento a lo largo de un vídeo. En el capitulo 6 se mostrara como usando las siluetas y los puntos característicos se realiza una estimación del cuerpo tridimensional del actor. En el capitulo 7 se desarrollara un método para extraer el esqueleto de una representación tridimensional del actor, usando métodos de contracción suavizada del volumen, además se compara este método con otras técnicas de extracción del esqueleto. En el capitulo 8 se mostrara una estrategia para realizar la estimación de pose del esqueleto encontrado a lo largo del vídeo y también se compara con otros métodos de estimación de pose basados en modelos. En el capitulo 9 se describirá el programa de computadora desarrollado para el sistema de visualización, en este sistema es posible ver el esqueleto sobrepuesto en cada uno de los vídeos capturados. Por ultimo se hablara de los resultados obtenidos sobre la extracción y seguimiento del esqueleto y se hablara sobre el trabajo futuro que deja esta tesis,

## 2 Trabajo Relacionado

La dinámica del cuerpo es un área importante de investigación dedicada a entender su comportamiento físico y dinámico en un ambiente complejo que puede servir para aplicaciones biométricas. Nuestro interés en particular es entender e interpretar el comportamiento humano en ambientes complejos.

En cierto número de aplicaciones es importante identificar las acciones de ciertas partes del cuerpo, por ejemplo la gesticulación de mano, análisis de la marcha, y análisis de la expresión facial [18]. Finalmente, el modelado de comportamiento humano puede servir para un gran número de aplicaciones como generar gráficos computarizados o la animación, entender comportamientos normales y patológicos, y el análisis de datos para aplicaciones médicas [32].

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 [7]. Los esqueletos reducen la dimensionalidad de objetos digitales pero en el mismo tiempo un camino para capturar las relaciones dinámicas esenciales [28].

La extracción y seguimiento del esqueleto se logra mediante la utilización de un conjunto de actividades organizadas dentro de un proceso. Estas actividades son: la adquisición de datos desde un objeto real, la reconstrucción 3D a partir de los datos de la captura, la extracción del esqueleto del objeto tridimensional reconstruido, y el seguimiento del esqueleto tomado como un proceso iterativo de captura con un esqueleto invariante topológicamente en el tiempo.

### 2.1. Adquisición de Datos

Existen diferentes enfoques en la adquisición de la información espacial de objetos reales, algunos basados en el procesamiento de imágenes, otros basados en sensores (mecánicos, electromagnéticos, e inerciales entre otros), y otros como el escáner de laser, la tomografía, el ultrasonido, etc [6].

Los métodos de adquisición basados en el procesamiento de señales utilizan las secuencias de imágenes producidas por una o varias cámaras. Cuando se utilizan varias cámaras se

explota la coherencia espacial dada por la visión estereoscópica, mediante el uso de puntos característicos como marcadores (luminosos, reflectivos, o detectados mediante filtros), y las siluetas de los objetos obtenidos mediante la segmentación de las imágenes [22]. Cuando se utiliza una única imagen se hace uso de modelos a priori y además se añaden restricciones en las búsquedas de soluciones, estos modelos pueden basarse en aproximaciones probabilísticas o aprendizaje de máquina.

## 2.2. Segmentacion de Imagenes

La segmentación de imágenes son un conjunto de métodos para dividir una imagen en regiones, dadas ciertas características. La segmentación puede ser automática es decir sin interacción del usuario, o semiautomáticas que requieren la supervisión manual [17]. A continuación mostraremos algunos de los métodos de segmentación más usados:

- Métodos de segmentación de contorno activos [13].
- Método Snake con uso de filtros de gradiente de dirección.
- Métodos que utilizan la coherencia espacio temporal de formas limitantes especialmente cajas y elipses [19].
- Métodos probabilísticos con redes bayesianas para modelar la interacción de campos [23] .

## 2.3. Reconstruccion Tridimensional

La reconstrucción tridimensional, son un conjunto de técnicas mediante las cuales objetos reales, son representados mediante estructuras de datos o funciones, haciendo énfasis en características como volumen y forma. Existe actualmente una gran cantidad de técnicas de reconstrucción y métodos de mallado 3D, dado un conjunto de puntos 3D no conectados [9].

### 2.3.1. Reconstrucción Basada en Imágenes

La reconstrucción basada en imágenes, tiene dos enfoques importantes uno con el uso de marcas, y otro sin ellas, además hay que tomar en cuenta los parámetros intrínsecos (distancia focal, distorsión, etc.) y extrínsecos (posición, orientación, etc.) de la cámara [10].

En la reconstrucción con el uso de marcas se hace un filtrado de la imagen para localizar estos marcadores los cuales son en general puntos de algún color poco presente en la escena como el blanco, un rojo o verde intenso, también se usan marcadores que emiten luz como pequeños bombillos, o el uso de imágenes en blanco y negro que tienen un patrón dado reconocible.

Con estos puntos segmentados y localizados en las imágenes se procede a realizar la solución de las ecuaciones de las transformaciones lineales correspondientes basadas en un sistema estéreo con un modelo de cámara pinhole [30].

## 2.4. Extracción del Esqueleto

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 [7]. Los esqueletos reducen la dimensionalidad de objetos digitales pero al mismo tiempo un camino para capturar las relaciones dinámicas esenciales [28].

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 ultimo 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 [8, 15, 27, 3].

Algunos métodos realizan estimaciones del esqueleto en 2D, y luego utilizan información a priori para estimar como fue transformado el esqueleto tridimensional real [24, 1, 5], otros enfoques realizan una reducción iterativa del volumen del cuerpo usando restricciones de contracción y minimización de energía, hasta encontrar un esqueleto irreducible [2, 33].

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) [20, 4, 16].

Para seleccionar un método de extracción es necesario describir las propiedades deseadas del esqueleto, según se requiera por las distintas aplicaciones, y un estudio de cómo los métodos existentes satisfacen estas propiedades [26].

### 2.4.1. Variedades

**Definition 1.** Una **variedad** es un espacio metrico  $M$  con las siguientes propiedades [25].

Si  $x \in M$ , entonces tiene algunos vecinos  $U$  de  $x$  y algun entero  $n \geq 0$  tal que  $U$  es homeomorfico a  $\mathbb{R}^n$ .



**Definition 2.** Una colección de subconjuntos  $A$  de un conjunto  $X$  es un **recubrimiento** de  $X$ , o una **cubierta** de  $X$ , si la unión de los elementos de la colección  $A$  es igual a  $X$ . Además, si los subconjuntos de  $X$  de dicha colección  $A$  satisfacen el ser disjuntos por pares,  $A$  es llamada partición de  $X$ .

Si el conjunto  $X$  tiene estructura de espacio topológico, el recubrimiento  $A$  es llamado recubrimiento abierto, o indistintamente cubierta abierta, si cada elemento de  $A$  es un conjunto abierto en  $X$ .

-

**Definition 3.** Sea  $X$  un conjunto. Se dice que  $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$  define una **metrica** en  $X$  si se cumplen las propiedades

1.  $d(x, y) \geq 0$  con igualdad si y solo si  $x = y$
2.  $d(x, y) = d(y, x)$
3.  $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$  desigualdad triangular

-

**Definition 4.** Dado un conjunto  $X$ , se dice que  $T$  es una topologia definida sobre  $X$  si  $T$  es una colección de subconjuntos de  $X$  tales que

1.  $\emptyset, X \in T$
2.  $U_\alpha \in T \implies \bigcup_\alpha U_\alpha \in T$
3.  $U_1, U_2, \dots, U_n \in T \implies \bigcap_{i=1}^n U_i \in T$

-

**Definition 5.** Sean  $X$  e  $Y$  espacios topologicos y  $f : X \rightarrow Y$ .

Se dice que  $f$  es un **homeomorfismo** y que  $X$  e  $Y$  son **homeomorfos** si  $f$  es biyectiva y tanto  $f$  como  $f^{-1}$  son continuas.

-

**Definition 6.** Una *Variedad (Manifold) topológica* de dimensión  $n$  es un espacio topológico de Hausdorff en el que todo punto tiene una vecindad abierta homeomorfa a una bola abierta en  $\mathbb{R}^n$ .

## 3 Extracción del Esqueleto

### 3.1. Método De Contracción Con Suavizado Laplaciano

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

- 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 fuerza de contracción que hace que la forma tridimensional pierda volumen.

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, este proceso es conocido como de simplificación, Este proceso se puede observar de forma simplificada en la figura **3-1**.

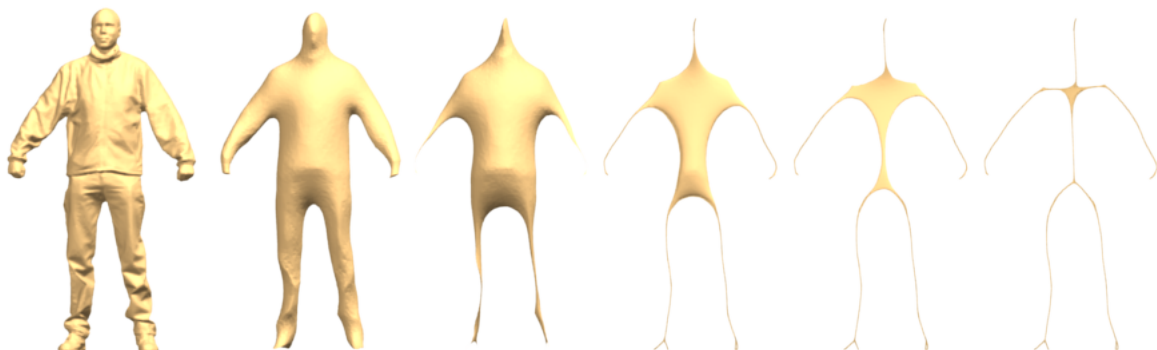


Figure **3-1**: Proceso de extracción del esqueleto

### 3.1.1. 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  $x_i$

### 3.1.2. Extracción del Esqueleto

Dada una malla de polígonos  $G = (V, E)$ , 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].

### 3.1.3. Contracción de la Geometría

El vértice 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 **3-2**.

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.

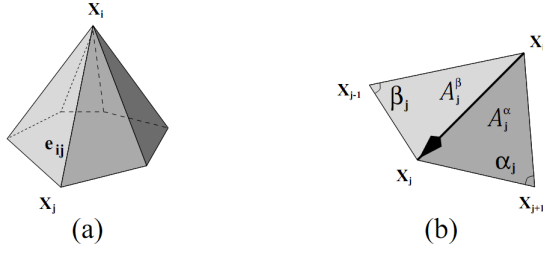


Figure **3-2**: a) El borde entre  $x_i, x_j$ . b) Los ángulos opuestos  $\alpha_{ij}$  y  $\beta_{ij}$ . Imagen Tomada de [12].

$\delta_i = -4A_i\kappa_i\mathbf{n}_i$ , 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 vértice  $i$ .

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 vértice  $V'$

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

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 vértice  $V^{t+1}$  usando la definición de  $L_{i,j}$

## 3.2. Comparación Experimental

Se uso la implementación hecha en [2] por los autores, para realizar la extracción del esqueleto de un modelo tridimensional que fue obtenido mediante el método de recuperación de forma desde las siluetas realizado por [31], como se observa en la figura **3-3**. De este modelo se registro una caminata durante 240 cuadros.

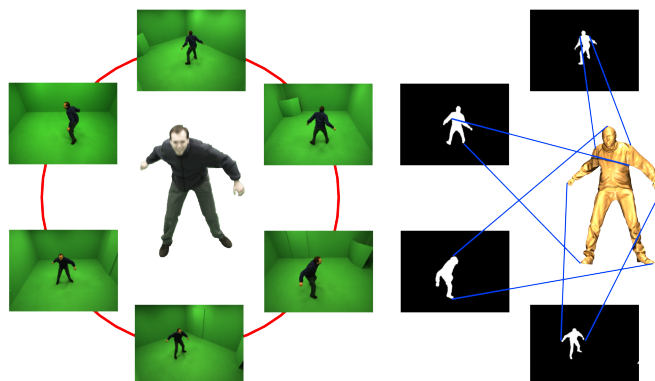


Figure 3-3: Modelo tridimensional obtenido con el método de [31].

El modelo fue proporcionado por los autores de [31] en el sitio web <http://www.mit.edu/~ibaran>. En este sitio web existe un repositorio de diez datasets.

Cada dataset contiene:

- Los parámetros de calibración de las ocho cámaras de la escena.
- Ocho imágenes correspondientes al fondo de la escena sin la persona presente.
- Ocho vídeos tomados desde distintos ángulos de la persona grabada durante 240 cuadros.
- Las siluetas de la persona en cada uno de los cuadros de cada cámara.
- Los modelos tridimensionales de los 240 cuadros obtenidos mediante el método propuesto en [31].
- Un esqueleto modelo.

Para evaluar el proceso de simplificación se variaron el numero de nodos usados para describir uniones en el esqueleto, luego se analizaba cada nodo y se clasificaba como **Valido** si este se encontraba en la posición correcta respecto al esqueleto modelo, **Erróneo** si no se encontraba en una posición donde existiera un nodo en el esqueleto modelo, y por ultimo por cada nodo que no se recupero en el esqueleto extraído se contaba como un nodo **Faltante**. Durante esta fase se utilizo el modelo tridimensional del primer cuadro de la animación del dataset llamado **I\_march**, a este modelo 3D se le realizo el proceso de contracción con un numero de 13 iteraciones para contraer el volumen hasta un umbral cercano a cero, luego en el proceso de simplificación se variaron el numero de nodos a extraer desde 32 hasta 16 como se observa en la figura 3-4, en esta figura se muestran de izquierda a derecha los resultados con 32 , 28, 24, 20, y 16 nodos . El esqueleto modelo contaba con un numero de 21 nodos

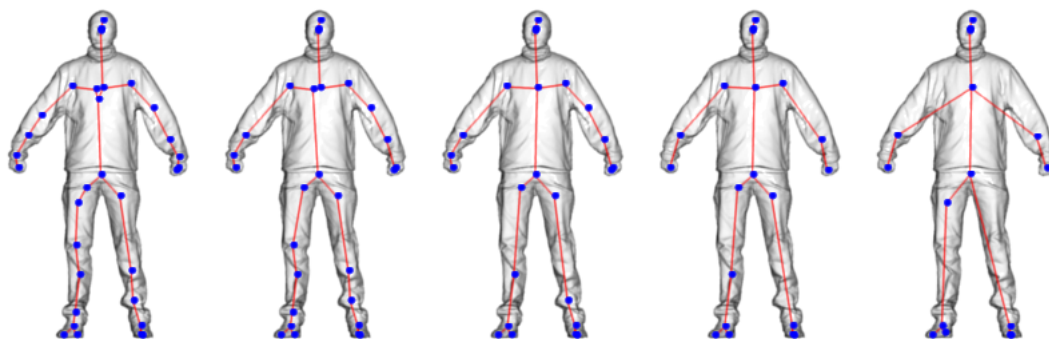


Figure 3-4: Variación del numero de nodos

Los resultados de este análisis se pueden observar en la tabla 3-1 donde 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 linea 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.

Table 3-1: Variación del numero de nodos en el proceso de simplificación.

Nodes	Valid	Erroneous	Missing
16	13	3	8
20	17	3	4
24	21	3	0
28	21	7	0
32	21	11	0

La segunda etapa del experimento consistía en la realización de extracciones del esqueleto en distintas momentos de la animación y observar la correspondencia topológica entre los esqueletos obtenidos para así observar como se comporta el método frente a transformaciones isométricas de la geometría de un cuerpo. En esta etapa se realizaron 13 iteraciones durante el proceso de contracción y se usaron 24 nodos en el proceso de simplificación. Se utilizo el mismo modelo del experimento anterior, se utilizaron distintas poses de este modelo tomadas cada 40 cuadros para un total de 6 poses, Cada pose representa una posición distinta de la persona durante la caminata, como se observa en la figura 3-5.

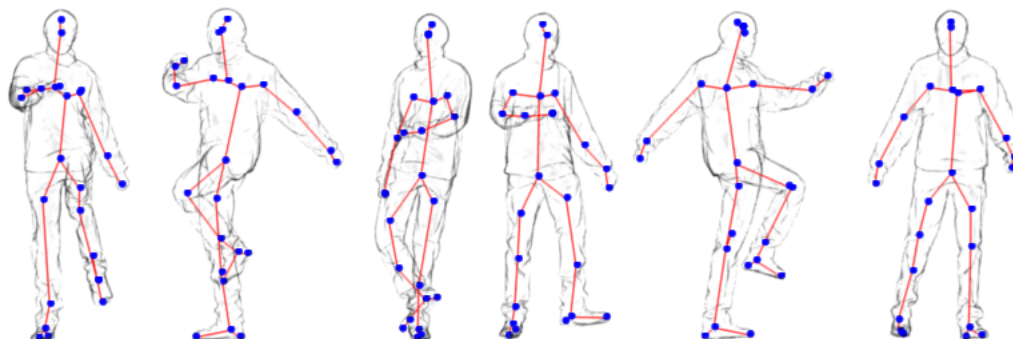


Figure 3-5: Distintas posiciones del mismo cuerpo.

En la tabla 3-2 se observan los resultados obtenidos al realizar cambios isométricos sobre la geometría del personaje estos cambios representan las distintas poses que tomaba la geometría del personaje en distintos momentos de la caminata. En la tabla 3-2 la columna **Cuadro** representa el momento en el tiempo en el cual se realizó la captura de la geometría, las demás columnas representan la misma información que en la tabla 3-1.

Table 3-2: Cambios isométricos sobre la geometría.

Frame	Valid	Erroneous	Missing
40	18	6	3
80	19	5	2
120	20	4	1
160	21	3	0
200	17	7	4
240	20	4	1

### 3.3. Resultados Experimentales

El método de extracción del esqueleto por contracción con suavizado Laplaciano recupera de forma óptima el esqueleto de un cuerpo bajo transformaciones isométricas, según se observa en la tabla 3-3, donde se recuperaron en promedio 19.71 nodos de los 21 necesarios para reconstruir el esqueleto en diferentes momentos del tiempo. Se observa también que el método posiciona mal 4.83 nodos en promedio, provocando que se usen mas nodos de los necesario para reconstruir el esqueleto. Por ultimo en esta tabla observamos que el método no pudo recuperar 1.86 nodos de los necesarios para la reconstrucción del esqueleto siendo necesario la intervención manual del usuario para recuperar el esqueleto en su totalidad.

	Valid	Erroneous	Missing
Mean	19.71	4.83	1.86
Standard deviation	1.47	1.47	1.47
Minimun	17	3	0
Maximun	21	7	4

Table 3-3: Resultados obtenidos al realizar transformaciones isométricas

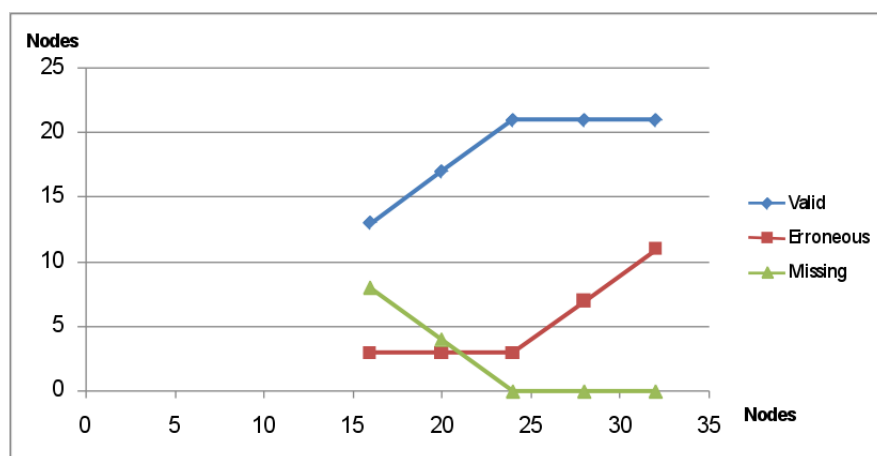


Figure 3-6: Gráfico de la variación de nodos validos, erróneos y faltantes durante la fase de simplificación

Durante la fase de simplificación el método presenta un comportamiento claro como se puede observar en la gráfica 3-6, en donde los nodos validos, luego de hacer la recuperación total de los 21 nodos del esqueleto no sufren perdida ni son sensibles al usar mas de 24 nodos (blue line). El método una vez alcanza su numero óptimo de nodos para realizar la recuperación, los demás nodos que se añadan serán puestos en localizaciones erróneas, además el método parece siempre tener un numero mínimo de 3 nodos recuperados erróneamente como se observa el la linea rojo del gráfico 3-6. La linea verde en el gráfico 3-6 describe el numero de nodos que hacen falta para recuperar el modelo, se observa que 24 es el numero de nodos requeridos para recuperar por completo el esqueleto, y que el uso de mas nodos no implica perdida en la recuperación del esqueleto.



## 4 Sistema de Captura con Videocamaras

La “Captura de Movimiento” es el nombre que reciben los sistemas que registran el movimiento y lo traducen dentro de un modelo digital [14]. Hoy día se utilizan distintos métodos para realizar la captura de movimiento, los mas ampliamente usados son los Sistemas Ópticos de Captura los cuales utilizan videocámaras para registrar las acciones de un actor durante cierto tiempo y luego usan técnicas fotométricas que permiten estimar información tridimensional del cuerpo en movimiento.

Estos sistemas opticos utilizan por lo general un arreglo de camaras dispuestas en diferentes posiciones y orientaciones, estos sistemas requieren calibrar las camaras de forma geometrica, fotometrica y temporal[21], para poder utilizar la informacion de la calibracion en las subsecuentes etapas del proceso de captura.

### 4.1. Ubicación de las Cámaras

### 4.2. Calibración de Cámaras

### 4.3. Captura Sincronizada de Vídeos

### 4.4. Resultados Experimentales

## 5 Extracción de las Siluetas Mediante el Método $\Sigma - \Delta$

5.1. Sustracción de Fondo

5.2. Extracción de Fondo Estático  $\Sigma - \Delta$

5.3. Segmentación de Vídeo

5.4. Resultados Experimentales

## 6 Extracción de Puntos Característicos

6.1. Puntos Característicos

6.2. Segmentación de Puntos Característicos

6.3. Seguimiento de Puntos Característicos

6.4. Resultados Experimentales

## 7 Reconstrucción Tridimensional del Cuerpo

7.1. Reconstrucción Estereoscópico

7.2. Triangulación de Delaunay

7.3. Forma desde las siluetas

7.4. Resultados Experimentales

## 8 Seguimiento del Esqueleto

8.1. Coherencia espacial y Temporal

8.2. Estimación de Pose

8.3. Comparación Experimental

8.4. Resultados Experimentales

## 9 Programa de Computadora Desarrollado

9.1. Sistema de Visualizacion

9.2. Diseño del Sistema

9.3. Descripcion de la Implementacion

## 10 Conclusiones

### 10.1. Trabajo Futuro

# Bibliography

- [1] O. Ait Aider, N. Andreff, J.M. Lavest, and P. Martinet. Simultaneous object pose and velocity computation using a single view from a rolling shutter camera. pages II: 56–68, 2006. 3D Reconstruction.
- [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] Derek Bradley, Tiberiu Popa, Alla Sheffer, Wolfgang Heidrich, and Tamy Boubekeur. Markerless garment capture. *ACM Trans. Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 27(3):99, 2008. 3D Reconstruction.
- [4] Fabrice Caillette, Aphrodite Galata, and Toby Howard. Real-time 3-d human body tracking using learnt models of behaviour. *Comput. Vis. Image Underst.*, 109(2):112–125, 2008. Motion Capture.
- [5] Zhanglin Cheng, Xiaopeng Zhang, and Thierry Fourcaud. Tree skeleton extraction from a single range image. In *PMA '06: Proceedings of the 2006 International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*, pages 274–281, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society. Skeleton Extraction.
- [6] K.M.G. Cheung, S. Baker, and T. Kanade. Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–77–I–84 vol.1, June 2003. 3D Reconstruction.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Edilson de Aguiar, Christian Theobalt, Marcus Magnor, and Hans-Peter Seidel. Reconstructing human shape and motion from multi-view video. In *2nd European Conference*



- on *Visual Media Production (CVMP)*, pages 42–49, London, UK, December 2005. The IEE. 3D Reconstruction.
- [10] Teofilo E. de Campos and David W. Murray. Regression-based hand pose estimation from multiple cameras. *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*, 1:782–789, 2006. Motion Capture.
- [11] Teofilo Emilio de Campos. *3D Visual Tracking of Articulated Objects and Hands*. PhD thesis, Department of Engineering Science - University of Oxford, 2006. Visual Tracking.
- [12] 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.
- [13] Matthew Flagg, Atsushi Nakazawa, Qiushuang Zhang, Sing Bing Kang, Young Kee Ryu, Irfan Essa, and James M. Rehg. Human video textures. In *I3D '09: Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pages 199–206, New York, NY, USA, 2009. ACM. Other.
- [14] E.E. Hemayed. A survey of camera self-calibration. In *Proceedings. IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2003.*, pages 351–357, July 2003. Camera Calibration Survey.
- [15] C. Hernandez Esteban and F. Schmitt. Multi-stereo 3d object reconstruction. In *3D Data Processing Visualization and Transmission*, pages 159–166, 2002. 3D Reconstruction.
- [16] Shaobo Hou, A. Galata, F. Caillette, N. Thacker, and P. Bromiley. Real-time body tracking using a gaussian process latent variable model. In *IEEE Internat. Conf. on Computer Vision*, pages 1–8, Oct. 2007. Motion Capture.
- [17] Ning Jin and F. Mokhtarian. Image-based shape model for view-invariant human motion recognition. In *Advanced Video and Signal Based Surveillance*, pages 336–341, Sept. 2007. 3D Reconstruction.
- [18] Paul G. Kry. *Interaction Capture and Synthesis of Human Hands*. PhD thesis, University of British Columbia, 2005. Motion Capture.
- [19] J.-L. Landabaso, L. Lizcano, and M. Pardas. Shape from inconsistent silhouette for free viewpoint video. In *Image Processing*, pages 213–216, Oct. 2008. 3D Reconstruction.
- [20] 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.

- [21] Cheng Lei and Yee-Hong Yang. Efficient geometric, photometric, and temporal calibration of an array of unsynchronized video cameras. In *Computer and Robot Vision, 2009. CRV '09. Canadian Conference on*, pages 162–169, May 2009. Camera Calibration.
- [22] Huei-Yung Lin and Jing-Ren Wu. 3d reconstruction by combining shape from silhouette with stereo. In *Pattern Recognition*, pages 1–4, Dec. 2008. 3D Reconstruction.
- [23] Wan-Chun Ma, Fu-Che Wu, and Ming Ouhyoung. Skeleton extraction of 3d objects with radial basis functions. In *SMI '03: Proceedings of the Shape Modeling International 2003*, page 207, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society. Skeleton Extraction.
- [24] Fabio Remondino and Andreas Roditakis. 3d reconstruction of human skeleton from single images or monocular video sequences, 2003. 3D Reconstruction.
- [25] Michael Spivak. *A Comprehensive Introduction to Differential Geometry*, volume 1. Publish or Perish, Inc, 3rd edition, January 1999. Other.
- [26] 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.
- [27] Jonathan Starck and Adrian Hilton. Surface capture for performance-based animation. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 27(3):21–31, May-June 2007. 3D reconstruction.
- [28] 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.
- [29] Mario Taddei. *Leonardo da Vinci's robots: New mechanics and new automata found in codices*. Leonardo3, 2007. Other.
- [30] Thorsten Thormählen and Hans-Peter Seidel. 3d-modeling by ortho-image generation from image sequences. In *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 papers*, pages 1–5, New York, NY, USA, 2008. ACM. Modeling 3D.
- [31] Daniel Vlasic, Ilya Baran, Wojciech Matusik, and Jovan Popović. Articulated mesh animation from multi-view silhouettes. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):1–9, 2008. 3D Reconstruction.
- [32] Jessica Junlin Wang and Sameer Singh. Video analysis of human dynamics - a survey. *Real Time Imaging*, 9:321–346, 2003. Motion Capture survey.
- [33] Yu-Shuen Wang and Tong-Yee Lee. Curve-skeleton extraction using iterative least squares optimization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(4):926–936, 2008. Skeleton Extraction.

- 
- [34] Beiji Zou, Shu Chen, Cao Shi, and Umugwaneza Marie Providence. Automatic reconstruction of 3d human motion pose from uncalibrated monocular video sequences based on markerless human motion tracking. *Pattern Recognition*, In Press, Corrected Proof:–, 2009. Motion Capture.