

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

Alexander Pinzón Fernández^a, Fabio Martínez Carrillo^a, Eduardo Romero Castro^{a,1}

^a*Grupo de Investigación Bioingenium, Universidad Nacional de Colombia*

Abstract

Este artículo presenta un análisis sistemático del método de extracción del esqueleto por medio de la contracción de un volumen con suavizado Laplaciano. El trabajo realiza una aproximación experimental al problema de la extracción del esqueleto, para encontrar el rendimiento del método evaluado frente a cambios isométricos, y durante la fase de simplificación. Esta evaluación utilizó el modelo tridimensional animado de una persona que realizaba una caminata, a este modelo se le extrajo el esqueleto y se compararon las diferencias en distintos instantes de la animación, y distintas configuraciones del proceso de simplificación. Los resultados muestran un óptimo rendimiento del método frente a las transformaciones isométricas, y múltiples problemas en la fase de simplificación de mallas.

Keywords: extracción del esqueleto, suavizado laplaciano

1. Introducción

En los últimos años se ha incrementado la demanda de sistemas para la captura de movimiento basados en sensores ópticos [3]. Estos sistemas permiten obtener una representación de cada una de las articulaciones de una persona que realiza movimientos. En el modelamiento de objetos articulados, la cinemática del movimiento está dado por la posición de las articulaciones en el tiempo, y estas posiciones a su vez dan una representación de la interacción entre cada uno de los componentes del sistema locomotor (las fuerzas de acción-reacción, los comandos neuro motores, sistema osteo-musculo-esquelético). La información recolectada mediante estos sistemas permite la realización de un análisis cuantitativo del movimiento permitiendo estimar de forma precisa datos como velocidad, aceleración, entre otras, estas medidas se utilizan en áreas como la medicina para el diagnóstico de patologías asociadas a la marcha, o en el cine

* Autor Correspondiente: Eduardo Romero. Carrera 30 45-03, Ed. 471 Facultad de Medicina, +57 1 3165491, edromero@unal.edu.co

para la animación de personajes, o en los deportes para analizar las posturas de un gimnasta.

En computación gráfica, el registro del movimiento de un esqueleto se realiza dado una secuencia lógica de actividades, que son: la captura de vídeo de una persona en movimiento, la reconstrucción 3D a partir de los datos de la captura, y la extracción del esqueleto del objeto tridimensional reconstruido. Uno de los puntos críticos, en este proceso es la extracción del esqueleto dado que no existe una definición formal para la representación de esta estructura [7]. Una aproximación típica, consiste en considerar los ejes medios de un objeto 3, definido como el lugar donde se encuentran los centros de todas las esferas de máximo radio inscritas en el cuerpo como se observa en la figura 1.

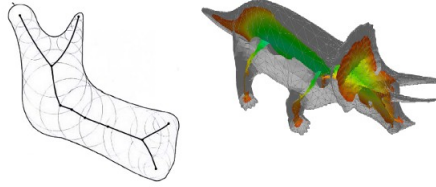


Figura 1: Medial axis and medial surface

En la literatura se han descrito diversos métodos de extracción del esqueleto y diferentes métricas que permiten identificar los métodos apropiados dada una aplicación específica [2]. Uno de los mejores métodos reportados en la literatura, para la extracción del esqueleto, es el método de suavizado Laplaciano [3] por sus ventajas de representación homotópica y las conexiones jerárquicas entre sus partes.

En este artículo se desarrolla un análisis experimental de la extracción del esqueleto usando suavizado laplaciano, que pretende ser un nuevo enfoque para el cálculo de patrones cinemáticos que permitan ser usados en la clínica para identificar movimientos normales y patológicos. El artículo está organizado como sigue: el capítulo 1 se presenta de forma general un resumen sobre trabajos relacionados en el área de la extracción del esqueleto que pueden ser tenidos en cuenta para una aplicación clínica (precisión, conservación de puntos anatómicos de interés). En el capítulo 2 se hace una descripción detallada de la técnica de extracción del esqueleto por contracción con suavizado Laplaciano. En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos dada un conjunto de experimentos realizados sobre el modelo. En el capítulo 4 se hace una discusión alrededor de los resultados obtenidos y su usabilidad en el área clínica. Finalmente en el capítulo 5 se describen algunas conclusiones y lineamientos para el trabajo futuro.

2. Trabajo Relacionado

En computación grafica se definen los esqueletos (estructuras 1D) como versiones simplificadas de la geometría y topología de un objeto 3D que permiten reducir la dimensionalidad de los objetos y capturar las relaciones dinámicas esenciales para describir la dinamica de un objeto, por ejemplo, en el análisis de marcha los movimientos normales y patologicos estan definifos por un conjunto de relaciones de sus articulaciones [16, 14]. Habitualmente, la extracción del esqueleto se realiza con técnicas que reducen la dimensionalidad de un objeto, teniendo en cuenta ciertas restricciones de contracción y minimización de energía hasta encontrar un esqueleto irreducible ó encontrar sus ejes medios [3]. Sin embargo estas representaciones simplistas generalmente pierden informacion de posiciones anatomicas importante para una apliación clínica. Por otra parte, las representaciones topológicas de un objeto tridimensional, permiten hacer simplificaciones mediante grafos y relaciones dadas por un esqueleto apriori que permite minimizar el error entre el esqueleto y el grafo [8, 10, 15, 4], lo cual conlleva a restricciones para la estimación de diferentes modelos.

Otras aproximaciones permiten hacer una estimación en 2D, para luego utilizar información a priori que permita estimar como fue transformado el esqueleto tridimensional real [13, 1, 6] el problema radica en utilizar modelos a priori ademas de esqueletos de entrenamiento. Finamelnte los modelos probabilísticos permiten resolver 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) [12, 5, 11] en estos modelos el problema radica en el uso de modelos a priori.

3. Método De Contracción Con Suavizado Laplaciano

Este metodo contrae iterativamente la malla por medio del suavizado laplaciano hasta tener un volumen de cero luego se simplifica la malla por medio de un algoritmo de colapso de bordes que permite obtener un esqueleto 1D del volumen. Este proceso se puede observar de forma simplificada en la figura 2. Este método busca la minimización de energía teniendo en cuenta los siguientes componentes.

- Un operador Lapaciano que pemite 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.
- Un fuerza de contracción que hace que la forma tridimensional pierda volumen.

A continuación se describe en detalle cada uno de los componentes que conforman este método.

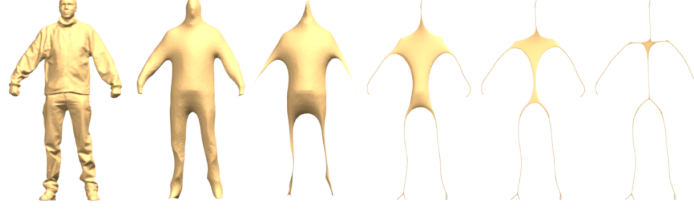


Figura 2: Proceso de extracción del esqueleto

3.1. Suavizado de Laplace

Una nueva posición en la malla esta dada por sus vecinos como se representa a continuación:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N x_j$$

donde N es el numero de vértice vecinos de x_i . Esta aproximación en general se restringe por una función de peso que permite ponderar ciertas características y esta definida como:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N w_j x_j$$

donde existe una función de peso w_j , para ponderar el vértice x_j .

3.2. Extracción del Esqueleto

A partir de una malla de polígonos $G = (V, E)$, con vértices V y aristas E , el problema de extracción de un esqueleto $S = (U, B)$ donde U ($U = [u_1^T, u_2^T, \dots, u_m^T]$) son los nodos definido por sus posiciones y B las aristas puede ser desarrollado basado 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 [3].

3.3. 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 α_{ij} y β_{ij} son los ángulos opuestos correspondiente al borde (i, j) , como se observa en la figura 3.

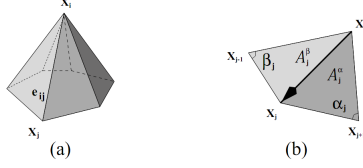


Figura 3: a) El borde entre x_i, x_j . b) Los ángulos opuestos α_{ij} y β_{ij} . Imagen Tomada de [9].

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 $4A_i$, κ_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 $L_{i,j}$

4. Experimentación

Se uso la implementación hecha en [3] 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 [17], como se observa en la figura 4. De este modelo se registro una caminata durante 240 cuadros.

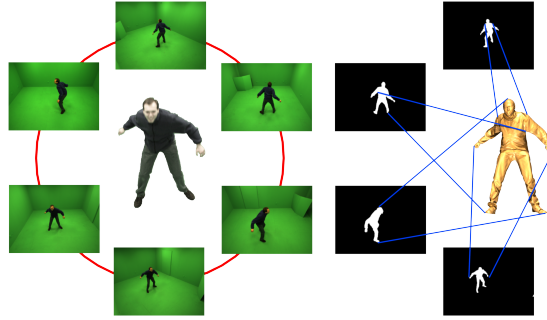


Figura 4: Modelo tridimensional obtenido con el método de [17].

El modelo fue proporcionado por los autores de [17] 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 [17].
- 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**, en la imagen 5 se observa cada tipo de nodo.

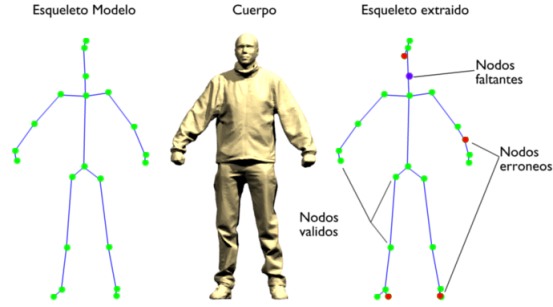


Figura 5: Descripción del tipo de nodos

Durante esta fase se utilizó el modelo tridimensional del primer cuadro de la animación del dataset llamado **I_march**, a este modelo 3D se le realizó el proceso de contracción con un número de 13 iteraciones para contraer el volumen hasta un umbral cercano a cero, luego en el proceso de simplificación se variaron el número de nodos a extraer desde 32 hasta 16 como se observa en la figura 6, 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 número de 21 nodos

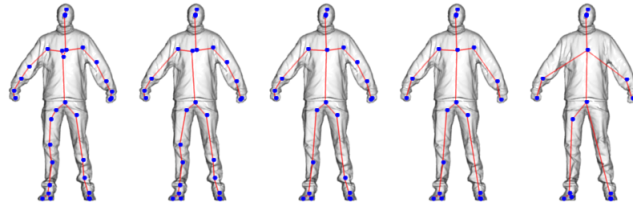


Figura 6: Variación del número de nodos

Los resultados de este análisis se pueden observar en la tabla 1 donde se muestran 5 columnas que representan la siguiente información, en la columna **Nodos** se muestra el número de vértices que se desean obtener después del proceso de simplificación, en la columna **Validos** se muestra el número de nodos que están correctamente localizados y que representaban uniones en el esqueleto, en la columna **Erróneos** se muestra el número 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 último en la columna **Faltantes** se muestra el número de nodos que hicieron falta para la correcta reconstrucción de un esqueleto válido para este modelo.

Cuadro 1: Variación del numero de nodos en el proceso de simplificación.

Nodos	Validos	Erroneos	Faltantes
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 7.

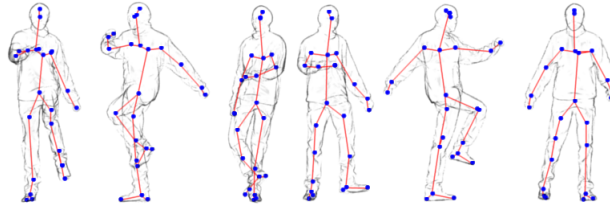


Figura 7: Distintas posiciones del mismo cuerpo.

En la tabla 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 2 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 1.

5. Resultados Experimentales

El método de extracción del esqueleto por contracción con suavizado Laplaciano recupera de forma óptima el esqueleto de un cuerpo bajo transformaciones

Cuadro 2: Cambios isométricas sobre la geometría.

Cuadro	Validos	Erroneos	Faltantes
40	18	6	3
80	19	5	2
120	20	4	1
160	21	3	0
200	17	7	4
240	20	4	1

isométricas, según se observa en la tabla 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.

	Validos	Erroneos	Faltantes
Media	19.71	4.83	1.86
Desviación Estándar	1.47	1.47	1.47
Mínimo	17	3	0
Máximo	21	7	4

Cuadro 3: Resultados obtenidos al realizar transformaciones isométricas

Durante la fase de simplificación el método presenta un comportamiento claro como se puede observar en la gráfica 8, 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 en la línea roja del gráfico 8. La línea verde en el gráfico 8 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.

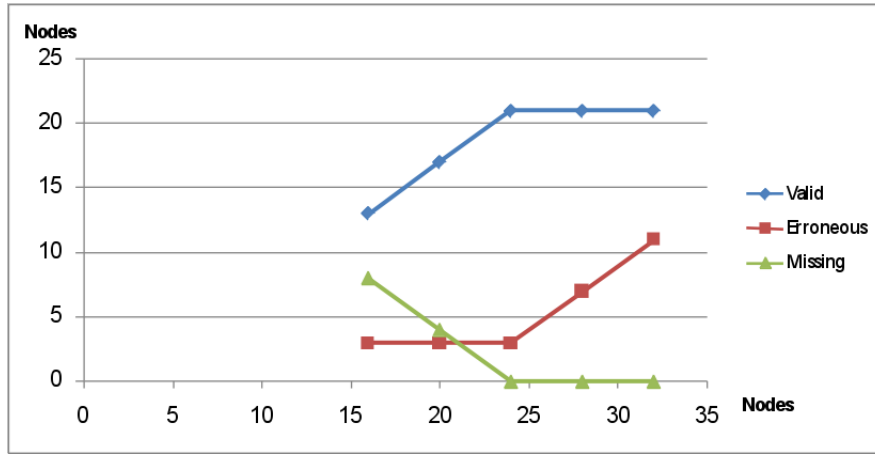


Figura 8: Gráfico de la variación de nodos validos, erróneos y faltantes durante la fase de simplificación

6. Conclusiones

El método de extracción mostró ser robusto y tener baja sensibilidad frente a cambios isométricos de la geometría, requiere de supervisión únicamente en la primera fase de simplificación para obtener el numero óptimo de nodos, luego el método puede trabajar de forma automática a o largo de todos los cuadros.

El método recupera de forma eficiente el esqueleto sin hacer uso de un modelo, eliminando la necesidad de estimar la pose minimizando el calculo necesario para ajustar el esqueleto encontrado con el modelo, y así mismo poder realizar de forma sencilla y automática el seguimiento del esqueleto a lo largo del vídeo,

7. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se puede mejorar la recuperación de información haciendo uso de la coherencia espacio temporal no presente en la técnica de extracción, para superar la perdida de información entre cuadros de vídeo.

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.

Agradecimientos

The captured performance data were provided courtesy of the Computer Graphics Group of the MIT CSAIL Vision Research (Cambridge, USA).

Referencias

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 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.
- [10] C. Hernandez Esteban and F. Schmitt. Multi-stereo 3d object reconstruction. In *3D Data Processing Visualization and Transmission*, pages 159–166, 2002. 3D Reconstruction.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Fabio Remondino and Andreas Roditakis. 3d reconstruction of human skeleton from single images or monocular video sequences, 2003. 3D Reconstruction.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.