

Digitalización, Voxelización, Relleno y Esqueletonización 3D de Órganos Pares Duros de Cabra Montesa

J. Ruiz de Miras¹, A. Santos¹, J.M. Pérez², M. Sarasa², F.J. Esteban³

¹Departamento de Informática

²Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología

³Departamento de Biología Experimental

Universidad de Jaén, Jaén, España

Abstract

En este trabajo se describe el proceso para la representación computacional de órganos pares duros (cuernos) de cabra montesa (*Capra pyrenaica*) mediante la voxelización de su superficie, el relleno del interior y su esqueletonización 3D a partir de la nube de puntos obtenida mediante una digitalización con escáner 3D. Para el desarrollo de estos algoritmos se ha implementado la versión 3D de los operadores de morfología matemática. El hecho de conocer de antemano la forma de los modelos ha permitido desarrollar un algoritmo a medida de relleno de cavidades mucho más eficiente que el algoritmo general basado en morfología matemática. Este trabajo interdisciplinar es el punto inicial para la realización de un estudio morfométrico completo y digital de la asimetría bilateral fluctuante en esta especie silvestre. Este tipo de estudios tienen un gran interés ecológico y actualmente se realizan de manera manual mediante técnicas artesanales.

1. Introducción

El tamaño de los cuernos en los bóvidos tiene importantes y diversas implicaciones tanto evolutivas como relacionadas con la biología de la conservación [Sch77]. Se considera como un indicador de la calidad de los individuos y está influido por diversos factores intrínsecos (sexo, edad, genotipo, cohorte) y extrínsecos (densidad de población, calidad del hábitat, lactancia, climatología, enfermedades o, incluso, explotación cinegética). Otro parámetro empleado en la caracterización de la calidad de los cuernos de un bóvido es la simetría. Diferentes estudios han puesto de manifiesto que estructuras u órganos pares tenderán a ser simétricos si se dan condiciones de estabilidad en el desarrollo del individuo o, por el contrario, podrán acumular un cierto nivel de asimetría bilateral fluctuante cuando uno o varios factores produzcan inestabilidad (estrés) durante el desarrollo [MS97]. Convencionalmente, la simetría (o asimetría, en su caso) se suele caracterizar de forma manual mediante el uso de parámetros unidimensionales como la longitud y el perímetro basal. Desde este punto de vista, la posibilidad de caracterizar la asimetría tridimensionalmente se presenta como un método mucho más sensible y resolutivo que las mediciones tradicionales.

Este trabajo describe la fase inicial del proyecto, consistente en digitalizar y calcular representaciones computacionales adecuadas (nube de puntos, voxelizaciones y esqueletos) para los cuernos de cabra montesa. Dichas representaciones serán la base para obtener de forma automática y precisa diversas medidas

que permitan calcular el grado de asimetría de los cuernos de cada cabra y, con ello, caracterizar los individuos según el grado de correlación de su nivel de asimetría y diversos factores de estrés durante su desarrollo.

2. Conceptos básicos de Morfología Matemática

La morfología matemática [Ser84] tiene como objetivo el estudio de la forma de las componentes conexas y su principal aplicación se ha realizado en el análisis de imágenes. Se basa en un conjunto de operadores algebraicos, las transformaciones morfológicas, que permiten extraer estructuras geométricas del conjunto sobre el que se aplican (imágenes o volúmenes) mediante la utilización de elementos estructurales de forma predefinida. Estos elementos estructurales se aplican sobre cada vóxel del conjunto y cambian su valor en función del valor de los vóxeles cubiertos por el elemento estructural utilizado.

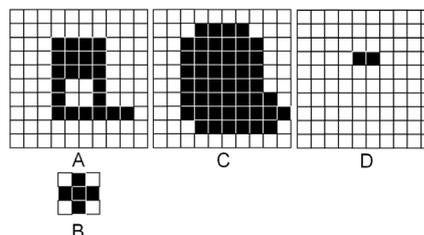


Figura 1: A: Conjunto, B: Elemento estructural, C: Dilatación y D: Erosión.

Las dos transformaciones morfológicas fundamentales se denominan *erosión* y *dilatación*. La operación de erosión,

notada \ominus , consiste en comprobar si el elemento estructural, situado sobre cada vóxel del conjunto, no está completamente contenido en el conjunto, en cuyo caso ese vóxel deja de pertenecer al conjunto. La operación de dilatación, notada \oplus , es la complementaria a la de erosión y consiste en situar el elemento estructural sobre cada vóxel del conjunto, pasando a pertenecer al conjunto aquellos vóxeles cubiertos por el elemento estructural. En la figura 1 se muestra un ejemplo de estas dos operaciones.

3. Digitalización 3D

El proceso de escaneado 3D se ha realizado utilizando el escáner de mano *FastSCAN Cobra* de Polhemus (<http://www.fastscan3d.com/>). Para la correcta digitalización de determinadas zonas oscuras o con brillo del cuerno se han tenido que utilizar valores elevados de sensibilidad en la configuración del escáner. Todos los cuernos han sido situados y orientados de la misma forma colocándolos sobre una cuadrícula con el receptor del escáner fijo actuando de origen de coordenadas. Para facilitar el proceso de digitalización, los cráneos se han apoyado en la cuadrícula sobre la mandíbula y los cuernos se han suspendido en el aire sujetos de hilos de seda anclados al techo, ocultando con una tela brillante negra el cráneo para evitar ser escaneado. Para minimizar el número de pasadas con el escáner, éstas se han realizado siguiendo las cuatro curvas generatrices características de los cuernos de la cabra montesa. En la figura 2 se puede apreciar la configuración del cráneo y el resultado obtenido de la digitalización de los dos cuernos.



Figura 2: Cráneo con cuernos y su digitalización 3D.

La nube de puntos final se obtiene como los vértices de la malla de triángulos obtenida tras *coser* las mallas correspondientes a cada pasada del escáner, rellenar los agujeros de la superficie y cerrar la malla de cada cuerno por su base. Este proceso se ha realizado utilizando las herramientas que para tal fin tiene el software *MeshLab* [CCC*08]. Para poder obtener la densidad de puntos necesaria para calcular posteriormente la voxelización a una resolución de 512^3 , se ha utilizado también la herramienta proporcionada por *MeshLab* para la subdivisión de la malla inicial. Por este motivo en la tabla 1 el número de puntos (P) es el mismo para las resoluciones de 128^3 y 256^3 y mayor para la de 512^3 .

4. Voxelización de la superficie

Para obtener las voxelizaciones con diferente nivel de detalle se encierra la nube de puntos dentro de un cubo englobante y se generan las distintas rejillas 3D dividiendo

el lado del cubo por la resolución deseada (128, 256 y 512 vóxeles en cada dirección). A continuación se recorre la nube de puntos y se activan aquellos vóxeles de la rejilla 3D que contienen algún punto. Una voxelización de 512^3 supone una mejora aproximada de un orden de magnitud respecto a la precisión de las medidas obtenidas con las técnicas manuales tradicionales de medición de los cuernos.

Elegir un tamaño de vóxel muy pequeño implica el lógico costo tanto en espacio de almacenamiento de la voxelización como en tiempo de procesamiento de los algoritmos. Además, puede producir agujeros si la densidad de puntos digitalizados no es suficiente. Para resolver este último problema existen varias alternativas, como utilizar técnicas de difusión lineal [JR09] o mediante la operación *cierre* (*dilatación + erosión*) de morfología matemática [Ser84]. Esta última ha sido la opción implementada en este trabajo. En la figura 3 se muestran las voxelizaciones de la superficie de un cuerno obtenidas a dos niveles de detalle. En la tabla 1 se muestra el número de vóxeles medio de la superficie de los cuernos obtenido para diferentes resoluciones (VS).

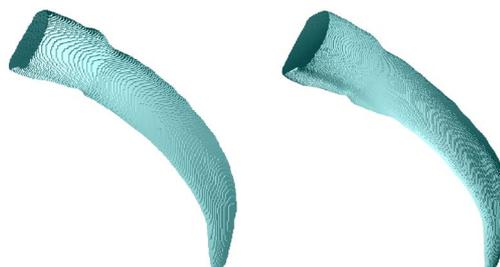


Figura 3: Voxelización a resolución de 256^3 y 512^3 .

5. Relleno de cavidades

Obtener la voxelización del interior del cuerno tiene un doble objetivo. Por un lado constituye una representación aproximada útil para extraer propiedades, como el volumen, que son de interés para los objetivos del proyecto. Por otro lado, es el paso previo para obtener la otra representación clave para el estudio de la morfología del cuerno, su esqueleto. La morfología matemática proporciona un algoritmo muy elegante para el relleno de cavidades. Si A es el conjunto de vóxeles donde se encuentra la cavidad a rellenar, \bar{A} es el complementario del conjunto A , p es un vóxel interior conocido y E es el elemento estructural utilizado para el relleno, entonces el conjunto final con la cavidad rellena se obtiene siguiendo el siguiente proceso iterativo:

$$\text{Caso base: } X_0 = p$$

$$\text{Iteración } k: X_k = (X_{k-1} \oplus E) \cap \bar{A}$$

El proceso termina cuando, para la iteración n , $X_n = X_{n-1}$, siendo entonces $X_n \cup A$ el conjunto resultante, es decir, el conjunto A con la cavidad a la que pertenece el vóxel p rellena.

Para voxelizaciones con un nivel de detalle alto, el tiempo de cómputo necesario para rellenar las cavidades utilizando este algoritmo es muy elevado, como se puede apreciar en la tabla 1 (TRMM), al requerirse muchas iteraciones del algoritmo. Sin embargo, si se conoce de antemano la forma de la cavidad a rellenar o el grosor de su frontera, es posible acelerar el algoritmo general, por ejemplo ajustando el tamaño y la forma del elemento estructural a la forma de la cavidad a rellenar de manera que se minimicen las iteraciones y por tanto el número de operaciones morfológicas a realizar. Este tipo de optimizaciones sólo son válidas para topologías concretas y grosores mínimos de la frontera considerables y conocidos. En el caso del cuerno, este tipo de optimización no es posible y se ha optado por buscar una mejora del tiempo de cómputo implementando un algoritmo a medida de la forma del cuerno, sin utilizar el algoritmo basado en morfología matemática.

Este nuevo algoritmo, para cada sección de la voxelización, realiza un barrido en una dirección prefijada a partir de cada vóxel de la frontera. El número máximo de vóxeles en cada línea de barrido lo determina un parámetro denominado nivel de tolerancia, establecido en base al diámetro máximo observado en los distintos cuernos. Si el barrido desde un vóxel frontera encuentra otro vóxel frontera antes de llegar al nivel de tolerancia, entonces todos los vóxeles de esa línea de barrido se añaden al relleno del cuerno (barridos verdes en la figura 4). Elegir un nivel de tolerancia bajo puede resultar en barridos que se queden cortos, lo que generaría agujeros dentro del cuerno (barridos amarillos en la figura 4). Esto se soluciona incrementando el nivel de tolerancia. También se pueden producir barridos fallidos si la frontera del cuerno no está perfectamente cerrada, al no encontrarse el vóxel final para ese barrido (barrido rojo en la figura 4). Esta situación se soluciona aplicando una operación de cierre morfológico tal y como se ha descrito en el apartado anterior. Como todos los cuernos tienen una topología homogénea, ha sido posible encontrar, para cada resolución, un valor único de nivel de tolerancia válido para el relleno de todos los cuernos (45, 90 y 150 para la resolución 128³, 256³ y 512³ respectivamente).

R	P	VS	VR	TV	TRMM	TRB	Mej.	TE (s)
				(s)	(s)	(s)		
128	384.760	10.023	26.035	0,056	15,135	0,267	98,2%	2,183
256	384.760	43.656	229.986	0,233	259,245	2,099	99,2%	25,093
512	1.337.132	239.631	2.924.996	1,671	4.994,329	16,229	99,6%	372,507

Tabla 1. Resolución (R), número de puntos (P), número de vóxeles de la superficie (VS), número de vóxeles al rellenar (VR), tiempo en voxelizar (TV), tiempo relleno morfología matemática (TRMM), tiempo relleno algoritmo de barrido (TB), mejora de tiempo (Mej.) y tiempo esqueletonizar (TE). Se muestra media obtenida para 8 cuernos distintos.

En la tabla 1 se muestran los tiempos medios de relleno del cuerno con este algoritmo (TRB). La toma de tiempos se ha realizado en un PC con procesador AMD Athlon 64 X2 4600+ y 4GB de RAM. Como se puede apreciar, la mejora

de tiempo es muy considerable respecto al algoritmo de relleno general de morfología matemática (Mej. en la tabla 1). Esto se debe a no poder utilizar en el algoritmo de morfología matemática elementos estructurales de mayor tamaño al tener la frontera un grosor muy pequeño en relación al tamaño de la cavidad a rellenar, como se aprecia en la figura 5, y por tanto el número de iteraciones necesarias para completar el algoritmo es muy elevado.

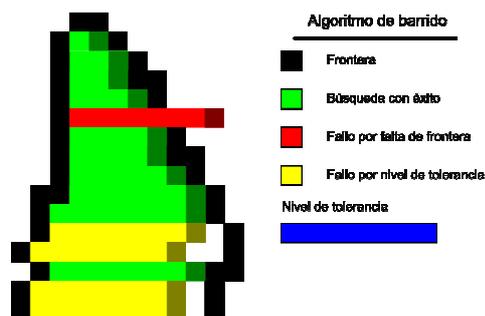


Figura 4: Algoritmo de relleno por barrido de secciones.

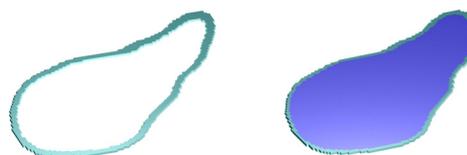


Figura 5: Sección de cuerno antes y después del relleno.

6. Esqueletonización

El esqueleto de un objeto 3D es el conjunto de centros de las esferas de radio máximo incluidas dentro del objeto. Esta representación 1D es muy compacta, puede ser vista como la esencia topológica del objeto 3D y tiene multitud de aplicaciones [CSM07]. En el ámbito de este estudio, el esqueleto proporciona una información resumen de la topología del cuerno de gran valor para establecer comparaciones respecto a la simetría.

Existe una gran variedad de algoritmos para calcular el esqueleto de un objeto [CSM07]. Los más utilizados cuando el objeto se representa mediante una voxelización son los basados en la técnica de *adelgazamiento*. De las diferentes propuestas en esta línea se ha elegido el algoritmo de Palagyi y Kuba [PK99] ya que se ajusta muy bien a la topología de los cuernos y está basado igualmente en morfología matemática. El algoritmo de adelgazamiento consiste en ir eliminando repetidamente *vóxeles simples* de la frontera del objeto 3D, entendiéndose por vóxel simple aquel que puede ser eliminado sin variar la topología del objeto. El algoritmo finaliza cuando ya no quedan vóxeles simples por eliminar. Las condiciones para eliminar vóxeles simples se establecen en base a elementos estructurales *E* que contienen dos tipos de vóxeles, los que describen la configuración de la frontera del objeto, conjunto *J*, y los que describen la configuración que debe tener el fondo alrededor de vóxeles del objeto, conjunto *K*.

Teniendo en cuenta este tipo de elementos estructurales $E = (J, K)$ con $J \cap K = \emptyset$, se define la transformación “hit-or-miss” con el conjunto A como:

$$A \otimes E = (A \ominus J) \cap (\bar{A} \ominus K)$$

Este tipo de transformación, utilizando el conjunto de elementos estructurales $E^{\{1..n\}}$ que definen las distintas configuraciones de los vóxeles simples, permite eliminarlos sin cambiar la topología del objeto. Utilizando esta transformación, se define la operación de *adelgazar* el conjunto A en base al elemento estructural E^i , como:

$$A \bullet E^i = A - (A \otimes E^i)$$

Y finalmente, el algoritmo para la obtención del esqueleto del conjunto A utilizando el conjunto de elementos estructurales $E^{\{1..n\}}$ consiste en la siguiente iteración:

$$\text{Caso base: } X_0 = A$$

$$\text{Iteración } k: X_k = X_{k-1} \bullet E^{\{1..n\}}$$

Este proceso termina cuando, para la iteración m , $X_m = X_{m-1}$, es decir, cuando no existe ningún vóxel simple que eliminar. El resultado del esqueleto del conjunto A será el conjunto X_m . La figura 6 muestra los esqueletos obtenidos a resoluciones de 256^3 y 512^3 para las voxelizaciones de la figura 3. En la tabla 1 se muestran los tiempos medios de procesamiento para calcular los esqueletos de los cuernos de prueba (TE). Como se puede apreciar, este cálculo es muy costoso para voxelizaciones con un nivel de detalle elevado.

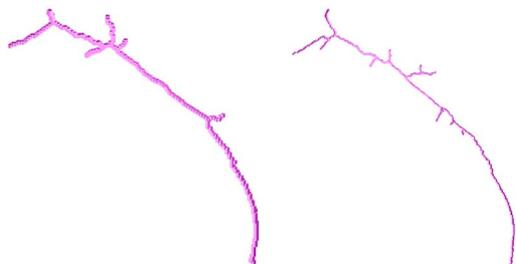


Figura 6: Esqueletos del cuerno de la figura 3 obtenidos por adelgazamiento a resoluciones de 256^3 y 512^3 .

7. Conclusiones

Se ha presentado el proceso y los algoritmos desarrollados para la obtención de las representaciones mediante voxelización y esqueleto 3D de órganos pares duros de cabra montesa. Al conocer de antemano la topología del cuerno, se ha desarrollado un algoritmo de relleno de cavidades a medida obteniendo mejoras de tiempo del 99.6% respecto al algoritmo general basado en morfología matemática para resoluciones de 512^3 . Estas representaciones 3D son la base para caracterizar de forma tridimensional la asimetría de los cuernos, lo que se presenta como un método mucho más sensible y resolutivo que las mediciones manuales tradicionales.

El siguiente paso del proyecto consistirá en la segmentación automática de las diferentes partes del cuerno de interés biológico (*medrones*), la obtención automática de diferentes medidas de asimetría y el estudio de correlación entre estos indicadores y distintos factores de estrés en el desarrollo de la cabra montesa. Por último, puesto que las operaciones de morfología matemática tienen un coste computacional muy alto, y dado que el procesamiento a realizar en cada vóxel es completamente independiente, se estudiará su paralelización vía GPU utilizando tecnologías tipo CUDA.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia bajo el proyecto de investigación TIN2007-67474-C03-03. El Plan Andaluz de Investigación subvenciona parcialmente las actividades de investigación de JRdM (TIC-144), JMP y MS (RNM-118), y de FJE (BIO-302). Los autores desean agradecer a la dirección y al personal del Espacio Natural de Sierra Nevada (Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía) la cesión de los cráneos utilizados en este estudio.

Referencias

- [CCC*08] CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F., RANZUGLIA, G.: MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. *Eurographics Italian Chapter Conference*, Fisciano, Italia, Julio 2008.
- [CSM07] CORNEA, N.D., SILVER, D., MIN, P: Curve-skeleton properties, applications and algorithms. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13, 2007, 530 - 548.
- [JR09] JALBA, A.C., ROERDINK, J. Efficient Surface Reconstruction From Noisy Data Using Regularized Membrane Potentials. *IEEE Transactions on Image Processing* 18, 2009, 1119 – 1134.
- [MS97] MØLLER, A.P., SWADDLE, J.P.: *Asymmetry, developmental stability, and evolution*. Oxford University Press, Oxford, UK. 1997.
- [PK99] PALAGYI, K., KUBA, A.: A parallel 3D 12-subiteration thinning algorithm. *Graphical Models and Image Processing* 61, 1999, 199-221.
- [Sch77] Schaller, G. B. *Mountain monarchs. Wild sheep and goats of the Himalaya*. The University of Chicago Press, Chicago, USA, 1977.
- [Ser84] SERRA, J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press. London. 1984.