

Modelado y Animación de un Felino Feline's Modeling and Animation

Francisco A. Madera¹, Pedro Moreno², Francisco Moo³

Universidad Autónoma de Yucatán
Facultad de Matemáticas

¹mramirez@correo.uady.mx, ²pedro_oct98@hotmail.com, ³mmena@correo.uady.mx

Resumen

El modelado de animales es una tarea que se lleva a cabo en muchos ámbitos de gráficas por computadora, como efectos especiales para películas, modelos para videojuegos, apps educativas, promoción y entretenimiento. En este trabajo aplicamos la tecnología de modelado y animación en 3D para crear un felino que pueda realizar animaciones. Proponemos mejoras a la técnica tradicional de modelado mediante el uso de la escultura digital y animación de objetos articulados. El modelo obtenido es una malla de 20,000 polígonos y la animación del felino tiene su base en un esqueleto compuesto de 20 huesos con 5 de ellos usando cinemática inversa.

Abstract

Animal modeling is a task performed in Computer Graphics, in fields of visual effects, movies, videogames, educational apps, entertainment. In this work, the modeling and animation technic is employed to create a 3D jaguar. We propose an enhancement of the common modeling and animation method by using sculpting and animation in articulated models. The model achieved is a polygonal mesh of a jaguar, and the skeleton constructed contains 20 bones, with five of them with inverse kinematics property.

Keywords: Modelado 3D, animación, esqueleto virtual, objeto articulado.

2010 Mathematics Subject Classification: 68U07

1. Introducción

El modelado gráfico de animales se ha ido perfeccionando con el paso de los años, hasta el punto de llegar a resultados realistas. Los cuadrúpedos y en particular los felinos los podemos encontrar, por ejemplo, a lo largo de la saga de videojuegos Far Cry, que desde su segunda iteración empezó a incluir a grandes felinos, así como otros tipos de animales, llegando a la versión actual Far Cry 6 [1]. También podemos encontrar el modelado de estos felinos en la industria del cine, siendo uno de los ejemplos más sorprendentes la adaptación Live Action del Rey León realizada por Disney en 2019 en donde todos los animales, incluyendo los felinos fueron modelados en 3D e incluidos en la película usando gráficas por computadora [2]. Otro ejemplo son los modelos de animales 3D de Google, en donde con un Smartphone y una aplicación se pueden visualizar con realidad aumentada [3].

En el estado de Yucatán habitaban jaguares, faisanes y venados. Varias organizaciones, en particular equipos deportivos han adoptado alguno de esos animales como mascota, logotipo o símbolo. En nuestro caso, la UADY [35] adoptó al jaguar como su imagen representativa debido a la importancia y significado que tenía para la cultura maya. Nuestra inspiración fue el jaguar, ya que la mayoría de los modelos se enfocan en los humanos y se ha olvidado la evolución en la construcción de los animales y otros objetos orgánicos.

En este trabajo se realiza el modelado de un jaguar combinando técnicas de modelado poligonal y esculpido digital, usando herramientas como el suavizado de malla y modificadores geométricos. Se obtuvo un modelo tridimensional de 10,206 vértices y 20,390 polígonos, así como una animación de 15 segundos, considerando 24 frames por segundo (fps). La construcción del esqueleto y posicionamiento de las articulaciones son pasos para el Rigging (sección 5.1). Éstos involucran la definición y ajuste de varios grados de libertad de los huesos, especificando posición y orientación. El esqueleto propuesto, contiene 20 huesos organizados en una estructura jerárquica con 5 huesos que contienen la propiedad de cinemática inversa (4 en las extremidades y 1 en la cabeza).

Las contribuciones del trabajo son el diseño y construcción de un modelo tridimensional, creación del esqueleto virtual, elaboración de la animación, la disponibilidad del modelo para usar en otras aplicaciones como realidad aumentada, videojuegos, para crear más animaciones, otros felinos; disponibilidad del esqueleto para otros cuadrúpedos.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describen los trabajos relacionados del modelado y animación de animales. En la sección 3 se presenta la metodología del trabajo, se describe el proceso de modelado poligonal y el esculpido digital. Posteriormente tenemos una sección dedicada a la animación del jaguar y por último las conclusiones y trabajos futuros.

2. Trabajos previos

El modelado de animales ha sido un tema de gran avance y motivación en artistas digitales para cuestiones básicamente de entretenimiento. Por ejemplo, en los videojuegos *Assassins Creed IV: Black Flag* (2013) [4] y *Shadow of the Tomb Raider* (2018) [5], podemos observar la existencia de modelos de jaguar de alta resolución, así como de otros animales. En el área de investigación también se han dado pasos importantes para mejorar la precisión y rapidez en la elaboración de los modelos. Entem et al. [6] propusieron un algoritmo para modelar animales a partir de su silueta que procesa por partes el modelo para luego unir todo. La silueta se obtiene de la imagen del animal, tanto de la vista lateral como de la vista posterior que es como nosotros trabajamos en la creación del jaguar. Por otra parte, Khan et al. [7] trabajaron con un modelo poligonal de cuerpo completo, sin divisiones, que es la manera como iniciamos el felino. Ellos se enfocaron en la refinación de texturas para obtener modelos realistas.

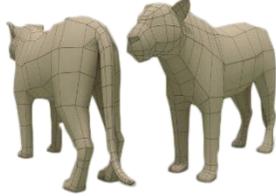
En cuanto a la animación del felino, definitivamente se utiliza un esqueleto virtual para el movimiento articulado. Vasilakis y Fudos [8] se enfocaron en la reducción de huesos de la armadura, sin perder precisión, para abarcar todos los vértices del modelo. Ellos recalcan que la armadura en modelos diferentes del humano requiere de mayor trabajo por el ajuste de la forma requerida. La anatomía y animación de un jaguar es de crucial importancia para los objetivos planteados en este trabajo.

Los primeros pasos de la modelación se basaron en las instrucciones de [9], mencionando tiempos y errores comunes del modelado 3D. En la revista de Blender [10] se propone combinar el modelo poligonal con el método de esculpido para lograr un modelo detallado. Se sugiere usar cinemática inversa en algunos huesos para acercarse a la realidad del movimiento de modelos articulados [11].

Existen sitios interesantes para obtener el modelo de felinos, como en [36], en donde podemos encontrar muchos modelos como referencia, aunque las reglas del sitio establecen concretamente el uso únicamente como referencia y no como base para crear otros modelos. Otro sitio es [37] en

donde, aunque no tenían condiciones más estrictas de uso, si era más difícil encontrar modelos gratuitos para experimentar.

Tabla1. Características geométricas de 3 modelos tomados como base para el modelado del felino.

Imagen del Modelo			
Modelo	Tigre Siberiano	Tigre	Tigre Blanco
Vértices	4359	338	17871
Caras	4258	299	17869
Aristas	8536	636	35738
Animación	No es posible debido a que el modelo está formado de muchas piezas	No es posible debido a que el modificador mirror no fue usado apropiadamente	Es posible animarlo, pero por su alto conteo de polígonos sería computacionalmente muy costoso de realizar
Ideas recolectadas	Mantener todo nuestro modelo como un mismo objeto en la mayoría de lo posible	Usar el modificador mirror para ahorrarnos trabajo, pero usarlo con cuidado y de manera adecuada	Mantener el conteo de polígonos estable para poder animar sin problemas
Recolectado de	https://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/1124816	https://www.cgtrader.com/free-3d-models/animals/mammal/lowpoly-tigers	https://www.cgtrader.com/free-3d-models/animals/mammal/scan-white-tiger-toy

La mayoría de los modeladores utilizan el método de modelado poligonal para crear un modelo con animación, pero también se pueden usar técnicas complementarias para los ajustes. En este trabajo se propone combinar esculpido con modelado poligonal para obtener el modelo detallado del felino. El esculpido digital [12, 13] utiliza herramientas de deformación con operaciones similares a las que llevaría a cabo un escultor trabajando sobre materiales como arcilla, yeso, piedra,

plastilina, etc. Con esto es posible presionar, estirar, añadir o retirar material, pulir, suavizar y actuar de muchas otras formas sobre la geometría existente en la escena.

Los modelos de jaguar encontrados en internet fueron de ayuda para la relación de la estructura ósea y movimientos de felinos (tigres, chitas, leones, panteras, leopardos). Durante la elaboración del videojuego MATYA [14] nos dimos cuenta de que la exploración en el modelado y sobre todo en la animación de cuadrúpedos era todo un reto y que era una oportunidad de desarrollo. En dicho videojuego, además del humano protagonista, se modeló y animó un venado, que ciertamente estaba muy rígido y parecía un robot.

En la Tabla 1 se describen las características de 3 modelos de felinos: Tigre Siberiano, Tigre, Tigre Blanco. Estos modelos se cargaron con el paquete de modelado Blender para examinar sus características como el nivel de detalle de la geometría, su disponibilidad para animar, la flexibilidad de alguna adecuación o extensión geométrica. Durante las pruebas de los modelos, descubrimos que, aunque eran aptos para ser animados, no consideramos que pudieran tener un buen desempeño en el tipo de animaciones. Sin embargo, la exploración de los modelos nos retroalimentó para la construcción de nuestro modelo.

En internet hay variedad de modelos, herramientas para malla de humanos, pero existen muy pocos modelos de felinos, solo algunos cuadrúpedos. Tampoco hay en internet archivos BVH (BioVision Hierarchy) [15] para crear animaciones reales por lo que creamos nuestras poses para el keyframing. Existe una diversidad de herramientas para modelar y animar objetos, Blender [16] y SketchUp [17] son gratis, mientras que Rhinoceros [18] y los programas de AutoDesk AutoCAD [19], 3dsMax [20], Maya [21] tiene un costo. Decidimos utilizar Blender debido a que es un paquete completo que constantemente se actualiza, es gratis y es código abierto.

3. Metodología

La metodología utilizada se muestra en los módulos de la Figura 1. En el módulo 1 se hace una revisión del modelo elegido, su parte geométrica, simetría y el tipo de movimientos comunes. En el caso de que el modelo sea requerido para alguna aplicación en particular (AR: Augmented Reality, VR: Virtual Reality, videojuegos), entonces debe realizarse un análisis adicional que incluye la proporción del tamaño del jaguar con el marcador, la posición, orientación y en la animación ajustar la traslación para que no se salga de la cámara que visualiza el usuario.

En el segundo módulo es donde sugerimos la inclusión del esculpido digital que en conjunto con el modelado poligonal ayuda a obtener un modelo adecuado. Este complemento se realiza de manera iterativa con base en los parámetros de la malla, vértices y polígonos.

El módulo siguiente, Texturización, consiste en el mapeo de una imagen 2D a un objeto 3D. Para eso se convierte el objeto 3D a 2D, mediante un proceso de aplanamiento denominado UV wrapping que se puede traducir como desenvolvimiento de un volumen. Se necesita bastante trabajo artístico para obtener un ajuste preciso de la textura en el objeto. Otro de nuestros resultados (módulo 4) es el esqueleto que proponemos para que se use en cualquier felino 3D. El esqueleto mantiene una jerarquía que sigue las reglas anatómicas, en donde el soporte se encuentra en la columna vertebral. Nuestro esqueleto utiliza huesos IK (Inverse Kinematics) para obtener animaciones reales en las extremidades.

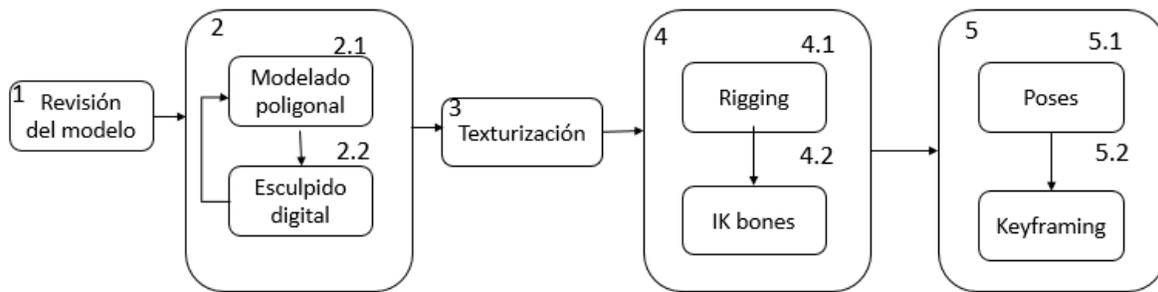


Figura 1. Los módulos para modelar y animar objetos en 3D. Los primeros 3 módulos se enfocan al modelado y los últimos dos módulos son para la animación.

Finalmente se realiza la animación en el módulo 5, en donde construimos 7 poses que son la entrada para el proceso de keyframing. En este módulo también se realiza la interpolación cuadrática para pasar de una pose a otra.

4. Modelado del felino

La malla de un objeto consta de polígonos que representan la forma del objeto, normalmente triángulos o cuadrados. Una malla $M = (V, E, F)$ se representa por un conjunto de vértices V , un conjunto de polígonos F y un conjunto de aristas E , que definen la geometría del objeto. La deformación de la malla debe ser calculada en cada tiempo de la animación, por lo que se necesita que el proceso sea lo suficientemente rápido, en especial en aplicaciones en tiempo real, que requieren una renderización de al menos 24 cuadros por segundo.

De acuerdo con las pruebas realizadas en algunos trabajos [7], los modelos orgánicos son más complicados, debido a que tienen un grado de suavidad para el movimiento en cada pose. Para comenzar posicionamos dos imágenes de referencia, la frontal y la de perfil como se muestra en la Figura 2.

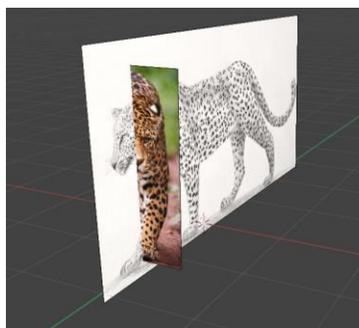


Figura 2. Las imágenes de referencia puestas de manera ortogonal dentro de Blender.

En el módulo 2 comenzamos con un cubo para obtener el cuerpo del felino (Figura 3). Los cubos se utilizan en el box modelling, aunque de igual manera es válido elegir otro objeto inicial como esferas. El proceso de extrusión también es requerido para dar profundidad a los detalles de la cara como ojos, nariz, boca.

Los modificadores son operadores que transforman un objeto en forma y topología. Lo que permiten es operar sobre el objeto, preservando su estado original, de forma automática, sustituyendo lo que tendríamos que hacer de forma manual. Existen diversos modificadores geométricos para modelar objetos; los más utilizados son Mirror, Boolean, Wireframe, Decimate.

La herramienta de escultura consiste en un conjunto de brochas del cursor con funciones específicas cada una, las cuales nos permiten modificar de forma directa nuestro modelo. El tipo de brocha indica el grosor de afectación a la región de la malla geométrica, que puede ser para empujar, jalar, inclinar, hacer alguna transformación. En algunas ocasiones hay que pasar la brocha varias veces para enfatizar la transformación geométrica, es decir, a mayor presión, se obtiene una repetición mayor de la misma transformación geométrica.

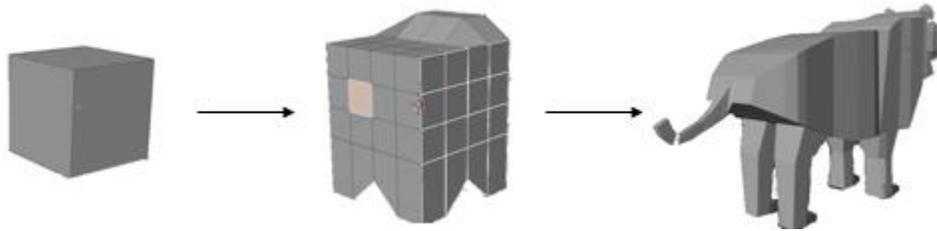


Figura 3. Primera versión del jaguar que comienza con un cubo, luego se subdivide y se mueven algunos polígonos, por último, se le da forma de cuadrúpedo.

Al detallar los rasgos de la cara, ojos, nariz, boca, mejillas, el jaguar fue perdiendo musculatura. El paso de quads a triángulos ayuda a tener más geometría para los detalles, pero duplica el número de polígonos. La primera versión de la cara se parecía a un hipopótamo. Al final se adicionan las orejas y esculpimos para obtener la versión final (Figura 4).

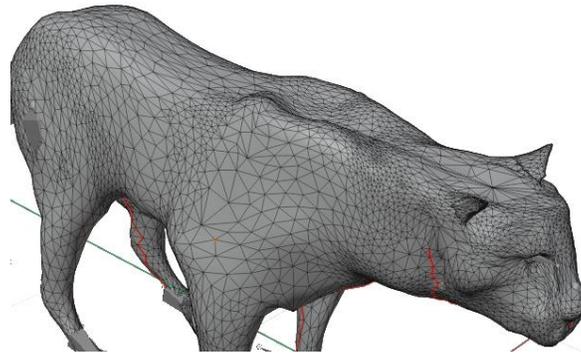


Figura 4. Modelado del Jaguar en su fase final.

4.1 Texturización

En el módulo 3, realizamos el mapeo de textura que consiste en envolver el objeto 3D con una imagen. El objeto 3D debe marcarse en algunas aristas (creases) para realizar el cambio de 3D a 2D. Se trata de mapear una imagen a una superficie, sin embargo, el problema básico es encontrar estos mapas. Considere mapear desde coordenadas de textura a un punto en una superficie (Figura 5), se requieren tres funciones: $x = x(s, t)$, $y = y(s, t)$ y $z = z(s, t)$.

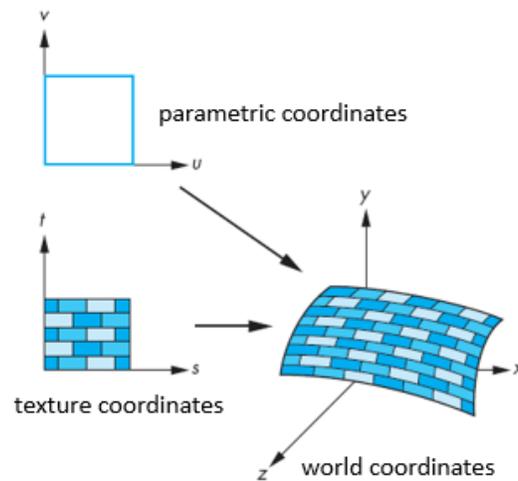


Figura 5. Ejemplo de conversión de coordenadas [22].

Los edge creases son las aristas que se marcan para realizar una futura acción que en nuestro caso es un UV wrapping. Dos maneras de obtener el UV unwrapping o desenvolvimiento del objeto se muestran en la Figura 6. Se recomienda marcar los creases de las aristas que no se ven como se ilustra en la Figura 7. Luego hay que abrir el Jaguar para verlo en 2D obteniendo la transformación de 3D a 2D.

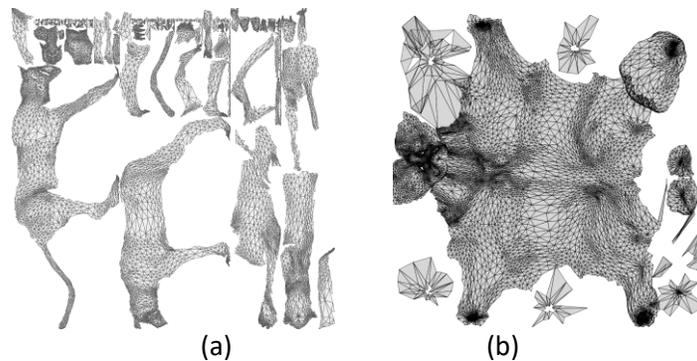


Figura 6: Desenvolvimiento del jaguar de dos maneras diferentes de marcar los edge creases.

Se elige una textura, una imagen que va de acuerdo con la piel del jaguar. El detalle aquí es que algunas regiones requieren de algún ajuste. Por ejemplo, los dedos del jaguar se pintaron de blanco. Otro de los problemas ocurre cuando se desea poner varias veces la textura para cubrir toda la región desenvuelta, pero se vería el empalme, así que usando GIMP [23] pudimos eliminar las fronteras mediante el método de seamless [24]. Este método consiste en poner más de dos capas de la misma imagen usada como textura, una sobre otra, con el propósito de replicar los límites verticales y horizontales de la figura para que este se cicle infinitamente, sin dejar huella del empalme de las texturas.

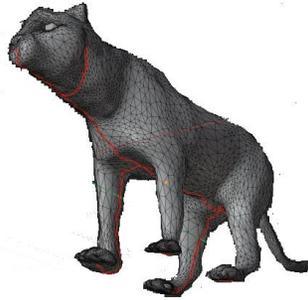


Figura 7. Creases de la malla del Jaguar que corresponden al desenvolvimiento de la Figura 6 (b).

5. Animación

Los objetos articulados se caracterizan por requerir una armadura o esqueleto virtual que dirige los movimientos de su malla. El sistema óseo de los felinos se puede apreciar en la Figura 8(a) y la armadura que realizamos se muestra en la Figura 8(b) con 20 huesos organizados en una jerarquía.

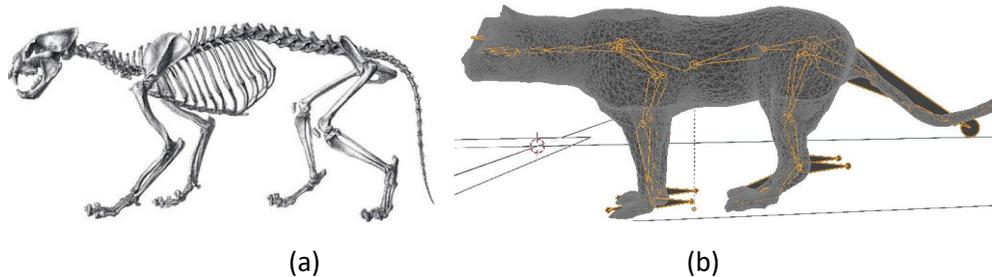


Figura 8. Esqueleto del jaguar [25] (a) y esqueleto propuesto (b).

Cada hueso abarca una región de la malla, es decir, cada vértice es dirigido por uno o más huesos. Este método se conoce como Linear Blend Skinning [26] que consiste en mover vértices de la malla mediante una mezcla de múltiples transformaciones geométricas. Cada transformación es la concatenación de una matriz de unión que lleva el vértice al espacio local de un hueso dado y una matriz de transformación que se mueve desde el espacio local de ese hueso a una nueva posición.

La animación esquelética es una técnica para animar modelos 2D o 3D; el modelo correspondiente está compuesto por dos elementos principales: una malla que modela su forma y un esqueleto que es una jerarquía de nodos conectados, o huesos que controlan la pose de la malla. El esqueleto es una jerarquía de huesos; un hueso se describe mediante una matriz de transformación 4×4 que define un marco de referencia para sus huesos hijos. El enfoque jerárquico de los sistemas de referencia, definidos por cada hueso, permite modelar cualquier movimiento de una extremidad mediante una matriz de rotación aplicada al hueso raíz.

Las transformaciones geométricas [27] asignan puntos o vértices en un espacio a puntos en otro espacio y las más comunes son escalamiento, traslación, rotación e inclinación. Las coordenadas de un punto p se puede representar en forma matricial $p = (x \ y \ z)^T$. Usando coordenadas homogéneas [28] para realizar transformaciones afines, le agregamos un renglón, $p = (x \ y \ z \ 1)^T$.

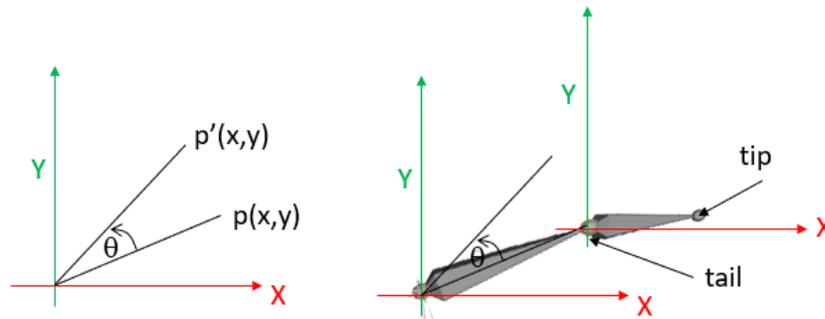


Figura 9. Un hueso se puede representar por un vector en el origen y puede rotar en su eje.

En la Figura 9 se ilustra un hueso con su parte frontal tip y su parte trasera tail. El hueso se puede representar en el plano cartesiano como un vector con coordenadas x, y , con su tail en el origen. Podemos rotar el vector (tip) en dirección contraria a las manecillas del reloj de la siguiente manera: $x' = x \cos \theta + y(-\sin \theta)$, $y' = x \sin \theta + y \cos \theta$, (θ es el ángulo que forma el hueso con el eje horizontal)

que equivale a multiplicar la matriz de rotación $M = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ por la coordenada del tip del hueso. Así, $p' = Mp$. En 3D, para girar alrededor del eje X usamos la siguiente matriz de rotación

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

También se pueden obtener las matrices de traslación, escalamiento, inclinación, o bien de rotación de un eje cualquiera, entre otras. Algunos algoritmos para generar el esqueleto de objetos han sido propuestos, como el trabajo de Reveret et al. [29], en donde hicieron un análisis estadístico para generar esqueletos en cuadrúpedos. Tomaron los modelos de un caballo, cabra, oso, león, rata, elefante, vaca, perro y cerdo.

5.1 Rigging

El esqueleto del objeto es una estructura jerárquica formada por huesos conectados. Cada unión especifica una transformación tridimensional que es heredada por los huesos hijos en la jerarquía. Un hueso es una transformación matricial debido a que describe la transformación de un punto específico.

El Rigging consiste en la construcción y movimiento del esqueleto. Cada hueso se define por su posición y orientación, que en coordenadas locales significa que el tail se sitúa en el origen. Estas coordenadas tienen su representación en coordenadas globales del esqueleto completo, B_i . Esta representación es una matriz de traslación de la posición inicial del hueso que, en sentido contrario, B_{i-1} , significa ir de la coordenada local al origen del esqueleto (coordenada global). La matriz 4×4 B'_i del hueso i , se trabaja en coordenadas locales, y cuando se modifica para trasladar o rotar, hay que multiplicarla por B_{i-1} para obtener el resultado en coordenadas globales que son las del esqueleto. También debe considerarse que el movimiento del hueso padre afecta a los huesos hijos.

La construcción del esqueleto (Figura 10), módulo 4, comienza con la raíz de la jerarquía, que es el centro de masa del objeto. Luego se crean los hijos, que en nuestro caso fueron las extremidades traseras, la cola y la columna vertebral. La cola tiene 4 huesos, dos de ellos de control. Las extremidades también son un conjunto de 5 huesos cada una. La columna vertebral está compuesta de 2 huesos principales de soporte, en donde el último es el padre de las extremidades delanteras que están unidas por un hueso de conexión con la columna vertebral para dar movimiento real a la espalda del jaguar. La parte delantera también está conectada con la columna vertebral para el movimiento de cuello y cabeza. Aquí tenemos 4 huesos, en donde el último tiene la propiedad de un IK para mayor flexibilidad en movimiento. Finalmente tenemos 2 huesos en los ojos que van siguiendo el movimiento del hueso con IK de la cabeza. La cinemática inversa es el proceso matemático que calcula los parámetros de la unión requerida para posicionar el final de una cadena cinemática, una fila de huesos en la jerarquía del esqueleto, en una posición y orientación relativa al comienzo de la cadena [30].

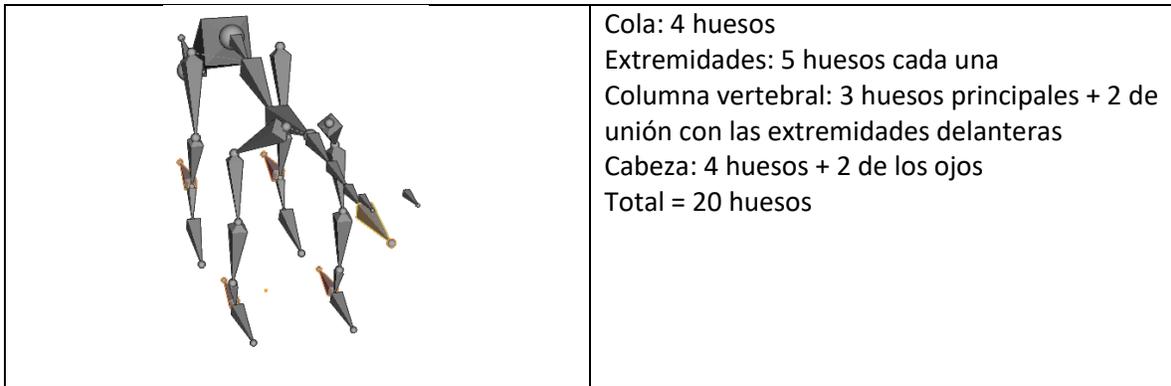


Figura 10. Esqueleto virtual del jaguar. Los huesos en naranja tienen la propiedad de IK.

5.2. Skinning

El Skinning es el proceso de agregar los vértices al esqueleto. Se puede asignar un vértice a uno o más huesos, dependiendo de la posición que ocupe [31]. Este proceso se ha usado en GPUs para aplicaciones en tiempo real, en particular podemos encontrar el trabajo de Kavan [22] quien introdujo el skinning con cuaterniones duales.

La deformación más simple asigna a cada vértice una articulación. Es decir, en el vértice $v = Mv$, el vértice v se transforma a su nueva posición v' . v es el vértice de referencia asociado a la unión y v' es la posición de la malla deformada. Un vértice que pertenece a dos huesos M_i , M_j , tendrán un 50% de peso en cada uno de ellos: $v' = w_0 M_i v + w_1 M_j v$, donde $w_0 = w_1 = 0.5$.

Cada hueso ejecuta una transformación geométrica de rotación o traslación. Cada vértice es multiplicado por varias matrices de transformación con peso y el resultado es sumado. En la siguiente expresión v es la posición del vértice, w_i es el peso asociado y M_i es la matriz de transformación, para cada hueso i que afecta a v .

$$v' = \sum_i w_i M_i v$$

Tenga en cuenta que los vértices de los pesos y las posiciones de enlace son constantes a lo largo del tiempo. Solo cambian las matrices, una por hueso. Las poses utilizadas se muestran en la Figura

11.

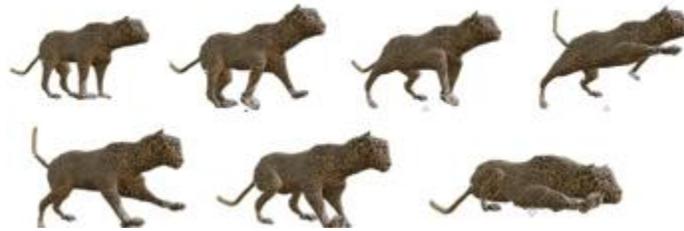


Figura 11. Poses del Jaguar usadas para la animación

Se utilizó el keyframing para conectar la animación de las poses. Keyframing es una técnica de animación en la que las curvas de movimiento se interpolan a través de las poses adyacentes [33]. Por lo general se utilizan métodos de interpolación para pasar de una pose a otra. Xu et al. [34] presentaron un método de aprendizaje para predecir la animación del esqueleto en objetos articulados. El algoritmo se entrena con varios objetos con esqueleto y se aplica a la malla del objeto correspondiente para dar como resultado la pose de la animación.

Por último, presentamos un video de la animación del jaguar. El resultado final llevo 6 horas de renderización en una Laptop Intel i7 2.59Hz, con tarjeta gráfica Nvidia GeForce 960 M. El escenario incluye texturas en el logo de la UADY y un efecto especial de partículas, y se puede ver en <https://youtu.be/Jj6A4NPLGR8>. Los motores de render disponibles son Cycles y Eevee. Utilizamos el segundo, que utiliza OpenGL con materiales de renderización basada en física. A diferencia de Cycles, Eevee no es un motor de render de Ray Tracing, sino que utiliza los rayos de luz para rasterizar.

6 conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo están englobados en la construcción del felino y su animación. Esta construcción incluye tanto la malla poligonal, como el esqueleto virtual. El modelo puede ser utilizado en alguna aplicación como AR, VR, videojuego, película, etc., o bien para seguir el proceso con las sugerencias emitidas en cada uno de los módulos. De particular intención nos enfocamos al esculpido digital que no ha sido muy explotado y usado en la actualidad, debido a que la mayoría de los modeladores utilizan las técnicas comunes como lo son el poligonal, CSG (Constructive Solid Geometry) y curvas. El uso del esculpido digital debe estar en continua relación iterativa con el modelado poligonal para que los ajustes sean los adecuados. Las herramientas de escultura utilizadas fueron Clay Strips, Inflate, Crease, Smooth y Grab.

En el proceso de modelado, en lugar de usar las transformaciones geométricas tradicionales como la traslación, rotación, escalamiento, inclinación, nos enfocamos a la deformación, que consiste en la modificación de una región de la malla sin perder la esencia del objeto. En comparación con los 3 modelos de la Tabla 1, el número de vértices del jaguar es mayor que el Tigre Siberiano y el Tigre, pero mucho menor que el Tigre Blanco. El número de polígonos fue bastante grande, pero tenemos más detalle en el modelo que los 3 tigres de referencia. En la animación está nuestra ganancia, ya que los 3 modelos presentan desventajas para seguir un esqueleto virtual.

En cuanto a trabajos futuros podemos mejorar las poses, ajustando el Rigging y el Skinning. De igual manera la cara del modelo se puede mejorar aún más agregando una dentadura, lengua y la capacidad de abrir y cerrar la boca. En cuanto a modelado podríamos reducir el número de polígonos

y vértices para mayor versatilidad en el movimiento. En el aspecto de la animación se pueden depurar las poses y movimientos para mejorar el realismo.

Referencias

- [1] Far cry 6, from Ubisoft, accedido el 20 de julio, 2020
<https://www.ubisoft.com/es-mx/game/far-cry/far-cry-6>
- [2] Greer, S. (2019). Simulating Life: Reimagining Realism in the Art of Animation. Accedido el 20 de julio, 2020. <https://mcstor.library.milligan.edu/handle/11558/4774>
- [3] S.C. Archimandritis, N.D. Giokaris, G.K. Loudos, K.S. Nikita, F. Scopinaro, E. Styliaris, A.D. Varvariguo. *A 3D high-resolution gamma camera for radiopharmaceutical studies with small animals*. Applied Radiation and Isotopes, **58**, num 4(2003), 501-508.
- [4] Assassin's Creed IV: Black Flag. Accedido el 20 de julio, 2020
<https://www.ubisoft.com/es-es/game/assassins-creed>
- [5] La Saga de Tomb Raider, accedido en julio 2020. Accedido en julio de 2020.
<https://vandal.elespano.com/sagas/tomb-raider>
- [6] L. Barthe, M.P. Cani, F. Cordier, E. Entem, M. Van De Panne, M. *Modeling 3D animals from a side-view sketch*. Computers & Graphics, **46**, (2015) 221-230.
- [7] S.A. Ali, S. Channa, M.H. Khan, S. Khan, K. Mengal, A.H. Qazi. *3D Modeling for Wildlife Encyclopedia Using Blender*. 3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme. Special Issue, November (2019), 133-147.
- [8] I. Fudos, Vasilakis, A. Skeleton-based Rigid Skinning for Character Animation. In *GRAPP 2009*, pp. 302-308.
- [9] Nawani Gaurav (ed.) (2015). Ancient Beast. Blenderart Magazine, 47, 17-20. Accedido en julio 2020
https://issuu.com/blenderart_magazine/docs/blenderart_mag-47_eng
- [10] Nawani Gaurav (ed.) (2013). Imagine the Possibilities! Blenderart Magazine, 41, 12-13. accedido en julio 2020. https://issuu.com/blenderart_magazine/docs/blenderart_mag-41_eng
- [11] Nawani Gaurav (ed.) (2011). Character Building! . Blenderart Magazine, 35, 6-15. Accedido en julio 2020. https://issuu.com/blenderart_magazine/docs/blenderart_mag-35_eng
- [12] C. Benincasa-Sharman , Frank Fitzpatrick, Ertu Unver. *Digital sculpting for historical representation: Neville tomb case study*. Digital Creativity. Vol 28, No. 2 (2017), pp 123 – 140
- [13] Claudio Calabrese, Francesco Di Renzo, Fabio Pellacini, Christian Santoni. *SculptStat: Statistical Analysis of Digital Sculpting Workflows*. arXiv preprint arXiv:1601.07765 (2016)
- [14] Luis Basto, Francisco A. Madera, Rocío Uicab. *Un Videojuego Multiplataforma como apoyo a la enseñanza de fracciones en el nivel básico*. Tecnologías Emergentes en la Educación, Editorial Pearson, diciembre 2015.
- [15] Centralsource, The BVH Format, <http://www.centralsource.com/blender/bvh/what.htm>, (accesado 20 juio 2020).
- [16] Blender3D. Free and open source 3D creation suite. <https://www.blender.org/> Accedido en julio, 2020.
- [17] SketchUp. Programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones basado en polígonos. <https://www.sketchup.com/es>
- [18] Rhinoceros. software para modelado en tres dimensiones basado en NURBS. Accedido en julio 2020. <https://www.rhino3d.com/>
- [19] AUTOCAD. software de diseño asistido por computadora (CAD). Accedido en julio 2020. <https://www.autodesk.mx/products/autocad>
- [20] 3ds Max. Software de modelado y renderización 3D para la visualización del diseño, juegos y animación. Accedido en julio 2020. <https://www.autodesk.mx/products/3ds-max>
- [21] MAYA3D. Software de renderización, simulación, modelado y animación por computadora 3D. Accedido en julio 2020. <https://www.autodesk.mx/products/maya/overview>
- [22] John Kessenich, Graham Sellers, Dave Shreiner. *The OpenGL Programming Guide*, 9th edition. Addison Wesley, USA, 2016.
- [23] Gimp, GNU Image Manipulation Program. Accedido en julio 2020. <https://www.gimp.org/>

- [24] Daniel Cohen-Or, Ran Gal, Hugues Hoppe, Eyal Ofek, Yonatan Wexler. *Seamless Montage for texturing Models*. Eurographics vol **29** (2010).
- [25] Esqueleto del jaguar. Accedido en julio 2020.
<https://i.pinimg.com/originals/ac/86/8d/ac868df39f07b5e538e1186247af5c4a.jpg>
- [26] L. Kavan, J. Zara. *Fast Collision Detection for Skeletally Deformable Models*, Computer Graphics Forum, vol. **24**, no. 3, pp. 363–372 (2005).
- [27] David H. Eberly, Philip Schneider. *Geometric Tools for Computer Graphics*. Morgan Kaufmann series in Computer Graphics (2003).
- [28] Huy Dang Ho, Mahmoud Tarokh. *Kinematics-Based Simulation and Animation of Articulated Rovers Traversing Uneven Terrains*. Robótica 2019, vol. **37**, No 6. pp 1057 – 1072.
- [29] Marie-Paule Cani, Christine Depraz, Laurent Favreau, Lionel Reveret. *Morphable model of quadrupeds skeletons for animating 3D animals*. Computer Animation, Conference Proceedings (2005). 10.1145/1073368.1073386.
- [30] Maurizio Nitti, Steven Poulakos, Alba Ríos, Mattia Ryffel, Robert Summer. *Parameterized Animated Activities*. Motion, Interaction and Games, MIG 2019. Octubre 28-30, Newcastle Upon Tyne, UK.
- [31] Raju P. *Skinning for Animation*. Character Rigging and Advanced Animation. Apress, Berkeley, CA (2019).
- [32] S. Collins, L. Kavan, C. O'Sullivan, J. Zara. *Geometric skinning with approximate dual quaternion blending*, in ACM Transactions on Graphics (TOG), **27**(4), Art. 105, ACM Press, New York, 2008.
- [33] Mo Chen, Enhua Wu, Ming Xie, Tianchen Xu. *A Skinning Method in Real-time Skeletal Character Animation*. International Journal of Virtual Reality. 10. 25–31. 10.20870/IJVR.2011.10.3.2818 (2011).
- [34] Evangelos Kalogerakis, Karan Singh, Zhan Xu, Yang Zhou. *Predicting Animations Skeletons for 3D articulated Models via Volumetric Nets*. 3DV 2019, Computer Vision and Pattern Recognition.
- [35] Universidad Autónoma de Yucatán, UADY. www.uady.mx
- [36] 3D Models for Professionals. www.turbosquid.com
- [37] The world's preferred source for 3D contents. www.cgtrader.com